

Trabalho de Conclusão de Curso

AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE SISTEMAS DE SECAGEM TÉRMICA DE LODO DE ESGOTO DOMÉSTICO

Mateus Weitgenant Crispim

Orientador: Dr^a Heike Hoffmann

2015/2



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE SISTEMAS DE
SECAGEM TÉRMICA DE LODO DE ESGOTO DOMÉSTICO**

MATEUS WEITGENANT CRISPIM

Trabalho apresentado à
Universidade Federal de Santa
Catarina para a Conclusão do
Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e
Ambiental.

Orientador: Dr^a. Heike
Hoffmann

Florianópolis, 2015.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

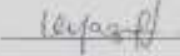
AValiação TÉCNICO-ECONÔMICA DE SISTEMAS DE SECAGEM TÉRMICA DE LODO
DE ESGOTO DOMÉSTICO

MATEUS WEITGENANT CRISPIM

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos
requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental – TCC II

BANCA EXAMINADORA:


Dr. Heike Hoffmann
(Orientador)


Prof. Dr. Maria Eliza Nagel Hassenteufel
(Membro da Banca)


Msc. Vanessa Guimarães Machado
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)

2015

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e minhas irmãs que ao longo de minha vida sempre me deram todas as oportunidades e suporte que necessitei para chegar até aqui.

A minha namorada Patrícia que sempre esteve ao meu lado em todos esses anos de namoro e me deu todo incentivo e apoio para me tornar quem eu sou hoje.

Aos meus colegas e amigos pelos bons momentos vividos durante o tempo de faculdade.

A todos meus colegas de estágio da FATMA e da ROTÁRIA DO BRASIL pelos ensinamentos ao longo do período de estágio em cada um desses locais.

Aos professores do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental pelo conhecimento passado ao longo da graduação.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até esse momento, meu sincero agradecimento.

RESUMO

O lodo é o principal subproduto gerado nas estações de tratamento de esgoto doméstico, uma vez que representa um grande volume a ser tratado e dispende de um elevado custo para seu tratamento. Esse material, por sua vez, apresenta uma grande quantidade de microrganismos e outros constituintes prejudiciais ao meio ambiente, assim torna-se necessário um tratamento adequado e um destino final apropriado. Para realização do tratamento dos lodos gerados nas estações são necessários grandes investimentos em equipamentos que são acrescidos em custos operacionais associados. A escolha da melhor alternativa para o tratamento nem sempre é simples, pois, envolve uma série de aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Comumente essa decisão fica limitada a alternativas onerosas como, por exemplo, a redução parcial do volume e demais constituintes, seguidos do transporte e disposição final em aterros sanitários. Assim, deve-se levar em consideração uma política mais sustentável no gerenciamento do lodo gerado, visando sempre à redução de seu volume final e a remoção de patógenos presentes nesse material. Nesse contexto, é possível apresentar as tecnologias de secagem térmica de lodo, que obtêm calor necessário para a remoção significativa de água e outros constituintes através de fontes energéticas diversas. O resultado da aplicação dessa tecnologia é um produto final de melhor qualidade com características adequadas para aplicações diversas.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo de esgoto; Secagem térmica; Custo do ciclo de vida.

ABSTRACT

The sludge is the major subproduct generated from domestic sewage treatment plants, since it represents a large volume to be treated and spends a high cost for its treatment. This material, in turn, has a large number of microorganisms and other constituents detrimental to the environment, so it becomes necessary to an appropriate treatment and an appropriate final destination. To perform the treatment of sludge generated at stations requires large investments in equipment are added on associated operational costs. The selection of the best alternative for the treatment is not always simple, as it involves a number of technical, economic and environmental aspects. Usually the decision is limited to expensive alternatives such as, for example, the partial reduction of volume and other constituents followed by transportation and disposal in landfills. Thereby, one should take into account a more sustainable policy in managing sludge generated, always seeking to reduce its final volume and the removal of pathogens present in this material. In this context, it is possible to present the thermal sludge drying technologies, which obtain heat required for substantial removal of water and other constituents through various energy sources. The result of the application of this technology is a final product best quality product with appropriate features for many applications.

KEYWORDS: Sewage sludge; Thermal drying; Lifecycle cost

ÍNDICE DE ABREVIACÕES

CAPEX	- <i>Capital expenditure</i> (Investimento em bens de capital)
CEDAE	- Companhia Estadual de Águas e Esgoto
CHP	- <i>Cogeneration - combined heat and power</i> (Cogeração de energia e calor)
COPASA	- Companhia de Saneamento de Minas Gerais
DL	- Digestor anaeróbio de Lodo
DP	- Decantador primário
ETE	- Estação de tratamento de esgoto
LAC	- Lodo ativado convencional
NBR	- Norma Brasileira
OPEX	- <i>Operational expenditure</i> (Despesas operacionais)
SEMAE	- Serviço Municipal de Água e Esgoto
UASB	- <i>Upflow anaerobic sludge blanket</i>
VPL	- Valor presente líquido

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de Secadores Rotativos	31
Figura 2: Secador transportador de esteira (túnel)	33
Figura 3: Secador de soleiras múltiplas	34
Figura 4: Esquema geral de uma planta de secagem solar	35
Figura 5: ETE1 - (UASB-LAC).....	42
Figura 6: ETE2 - (DP-LAC-DL).....	43
Figura 7: Descrição da alternativa A1.....	45
Figura 8: Descrição da alternativa A2.....	46
Figura 9: Descrição da alternativa A3.....	47
Figura 10: Descrição da alternativa A4.....	47
Figura 11: Descrição da alternativa A5.....	48
Figura 12: Descrição da alternativa A6.....	49
Figura 13: Avaliação energética diária da ETE 1	67
Figura 14: Avaliação energética anual por habitante da ETE 1	68
Figura 15: Avaliação energética diária da ETE 2	69
Figura 16: Avaliação energética anual por habitante da ETE 2.....	70
Figura 17: Avaliação do custo operacional diário ETE 1	71
Figura 18: Avaliação do custo operacional diário ETE 2	72
Figura 19: Avaliação do custo total de investimento para ETE 1 e ETE 2	74
Figura 20: Análise comparativa custos operacionais, de investimento e total ETE 1	75
Figura 21: Análise custo total por habitante para ETE 1	76
Figura 22: Análise comparativa custos operacionais, de investimento e total ETE 2	77
Figura 23: Análise custo total por habitante para ETE 2	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de adensamento de lodo	19
Tabela 2: Forma de estabilização e métodos de aproveitamento ou disposição final.....	21
Tabela 3: Características de secadores diretos e indiretos.....	29
Tabela 4: Composição típica dos gases constituintes do biogás	36
Tabela 5: Descrição das alternativas avaliadas para cada uma das estações de tratamento.....	44
Tabela 6: Dados iniciais para realização dos cálculos.....	50
Tabela 7: Custo de manutenção do sistema para aproveitamento do biogás	57
Tabela 8: Ciclo de vida dos equipamentos	62
Tabela 9: Resumo dos resultados obtidos ETE 1.	63
Tabela 9: Resumo dos resultados obtidos ETE 1 (Continuação).	64
Tabela 10: Resumo dos resultados obtidos ETE 2.	65
Tabela 10: Resumo dos resultados obtidos ETE 2 (Continuação).	66
Tabela 11: Características do esgoto e vazão de projeto.....	86
Tabela 12 – Parâmetros de projeto – Lodo ativado	87
Tabela 13 – Parâmetros de projeto - Tanque de aeração após UASB ...	89
Tabela 14 – Parâmetros do decantador primário	91
Tabela 15 – Resultados do decantador primário	92
Tabela 16 – Parâmetros de projeto - Tanque de aeração após decantador primário	93
Tabela 17 – Resultados Tanque de Aeração após decantador primário	93
Tabela 18 – Parâmetros e resultados para os decantadores secundários - Tanque de Aeração após UASB	94

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo Geral.....	16
2.2. Objetivo Específico	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. Lodos de Esgoto	17
3.1.1. Conceitos Gerais.....	17
3.1.2. Classificação de lodos gerados em ETE.....	18
3.1.3. Etapas de tratamento de lodo em ETE.....	18
3.1.3.1. Adensamento.....	19
3.1.3.2. Estabilização.....	20
3.1.3.3. Desidratação.....	21
3.1.3.4. Higienização.....	22
3.2. Disposição final e formas de aproveitamento do lodo .	23
3.2.1. Disposição de lodo em aterro sanitário.....	23
3.2.2. Uso de lodo na agricultura.....	24
3.2.3. Incineração.....	24
3.3. Tecnologias de tratamento de efluentes domésticos	25
3.3.1. Lodos Ativados.....	25
3.3.2. Reatores UASB.....	26
3.4. Secagem Térmica de Lodo	26
3.4.1. Conceitos gerais.....	26
3.4.2. Formas de transferência de calor.....	27

3.4.2.1.	Processo de Secagem por Convecção.....	27
3.4.2.2.	Processo de Secagem por Condução.....	28
3.4.2.3.	Processo de Secagem por Radiação.....	28
3.4.3.	Consumo de energia térmica.....	28
3.4.4.	Classificação dos secadores térmicos.....	28
3.4.5.	Tecnologias de secagem térmica.....	30
3.4.5.1.	Secadores Rotativos.....	30
3.4.5.1.1.	Secadores rotativos diretos.....	31
3.4.5.1.2.	Secadores rotativos indiretos.....	32
3.4.5.2.	Secadores tipo esteira (Túnel)	32
3.4.5.3.	Secadores de soleiras múltipla.....	33
3.4.5.4.	Planta de Secagem Solar.....	34
3.5.	Casos de secagem térmica de lodo no Brasil	35
3.6.	Geração e aproveitamento do biogás gerado em ETE	36
3.6.1.	Composição e características do biogás.....	36
3.6.2.	Estimativa de produção de biogás em ETE.....	37
3.6.3.	Formas de transformação e utilização do biogás aplicado à secagem térmica.....	38
3.6.3.1.	Combustão direta sem aproveitamento do calor.....	38
3.6.3.2.	Combustão direta com aproveitamento do calor.....	38
3.6.3.3.	Cogeração de energia elétrica e térmica.....	38
3.7.	Análise do custo do ciclo de vida (ACCV).....	39
3.7.1.	Classificação dos custos.....	39
3.7.2.	Análise da viabilidade econômica.....	39
3.7.2.1.	Método do valor presente líquido (VPL).....	40

4. METOLOGIA.....	41
4.1 Descrição das estações de tratamento avaliadas no trabalho	41
4.1.1 ETE 1 - Reator UASB seguido por lodo ativado convencional.....	41
4.1.2 ETE 2 - Lodo ativado convencional seguido de digestor de lodo.....	42
4.2 Descrição das alternativas para avaliar o sistema de secagem térmica.....	43
4.3 Cálculo da energia disponível no biogás.....	53
4.3.1 Cálculo da geração de energia elétrica.....	53
4.3.2 Cálculo da energia térmica disponível.....	54
4.4 Cálculo do custo operacional diário	54
4.4.1 Custo com disposição final de lodo.....	55
4.4.2 Custo de operação e manutenção secador térmico.....	56
4.4.3 Custo de operação e manutenção do sistema de biogás e motor-gerador.....	56
4.4.4 Custo com energia elétrica.....	58
4.4.5 Custo com gás natural.....	58
4.4.6 Ganho financeiro com a geração de energia elétrica.....	59
4.4.7 Cálculo do valor presente do custo operacional.....	60
4.5 Custos de investimento no sistema de secagem térmica	60
4.6 Custo total do sistema avaliado	61
4.7 Análise do ciclo de vida do projeto.....	61
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62

5.1. Avaliação energética ETE 1.....	67
5.2. Avaliação energética ETE 2.....	69
5.3. Avaliação do custo operacional diário ETE 1.....	71
5.4. Avaliação do custo operacional diário ETE 2.....	72
5.5. Avaliação das diferentes alternativas com base no valor presente	73
5.5.1. Avaliação do custo total de investimento para ETE 1 e ETE 2	73
5.5.2. Análise comparativa custos operacionais, de investimento e total ETE 1	74
5.5.3. Análise comparativa custos operacionais, de investimento e total ETE 2	76
6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
ANEXO – DIMENSIONAMENTO DAS ESTAÇÕES.....	86
APÊNDICES – CUSTOS TOTAIS DE CADA ALTERNATIVA...	97

1. INTRODUÇÃO

O aumento populacional nos grandes centros urbanos ao longo das últimas décadas, somado ao grande desenvolvimento econômico é sem dúvida o principal fator para o aumento da geração de resíduos provenientes das estações de tratamento de esgoto. É crescente a preocupação em relação à gestão desses subprodutos que inevitavelmente são gerados ao longo do processo de tratamento.

No Brasil, nos últimos anos, vêm ocorrendo uma expansão dos serviços de saneamento, tanto na coleta quanto no tratamento dos esgotos sanitários. No ano de 2003, o índice médio de coleta no país era de 38,5% e atingiu 48,6% em 2013, já o tratamento apresentou uma variação de 29,2% para 39% no mesmo período, o que resultou um aumento na quantidade de resíduos gerados nas estações de tratamento (BRASIL, 2014).

Ao longo do tratamento de esgoto, geram-se diversos tipos de resíduos que devem receber um tratamento adequado antes de seu destino final. Entretanto, é o lodo, o resíduo que apresenta a maior parcela e importância (ANDREOLI et al., 2001).

A escolha da melhor alternativa para o tratamento de lodo nem sempre é simples, pois envolve aspectos de ordem técnica, econômica e ambiental. No Brasil, em geral, a decisão fica limitada a alternativas caras e complexas como, por exemplo, a redução parcial de seu volume seguido de seu transporte e a disposição final em aterros sanitários (JORDÃO; PESSÔA, 2014).

Após a entrada em vigor da Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010), que prevê a redução dos resíduos encaminhados para aterros sanitários, a tendência é que haja uma diminuição na quantidade de lodo destinada para esses locais e um aumento do seu uso, por exemplo, na agricultura e como fonte de energia.

Neste contexto, é possível apresentar as tecnologias de tratamento de lodo de esgoto, com ênfase para a secagem térmica que será melhor descrita no decorrer do trabalho. Trata-se de um processo que consiste na elevação da temperatura desse material o que provoca a evaporação da água e a destruição de organismos patogênicos havendo a redução significativa do volume final de lodo. O resultado é um produto

final de fácil estocagem, manuseio e transporte (ANDREOLI et al, 2006).

Existem diversas tecnologias de secagem térmica de lodo, cada uma envolvendo uma série de singularidades e custos associados. Para a escolha da melhor alternativa de secagem térmica deve-se levar em consideração fatores como: a quantidade de lodo gerada na estação (que depende do tipo de tratamento empregado), fontes de energia disponíveis, os custos dos equipamentos e os custos operacionais associados à escolha.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Apresentar a secagem térmica como uma alternativa de tratamento de lodo, através da análise de sua utilização em duas diferentes estações de tratamento, dimensionadas para atender uma população de 100.000 habitantes.

2.2. Objetivo Específico

- Levantar dados técnicos que auxiliem na avaliação de sistemas de secagem térmica de lodo.
- Determinar os custos totais associados a um sistema de secagem térmica de lodo.
- Comparar as alternativas propostas a partir da avaliação energética dos sistemas e dos custos operacionais, de investimento e total dos sistemas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Lodos de Esgoto

3.1.1. Conceitos Gerais

Em termos gerais o esgoto sanitário doméstico é constituído por uma mistura de água, sólidos orgânicos e minerais. Contém aproximadamente 99,9% de água e o restante (0,1%) de sólidos (VON SPERLING, 2014). Dentro desse 0,1% de sólidos cerca de 70% de seus constituintes são materiais orgânicos tais como: proteínas, carboidratos e gorduras, os 30% restantes são os materiais inorgânicos tais como areia sal e metais (DAVID, 2002).

O principal objetivo do tratamento de esgoto doméstico é realizar a separação da parte sólida e promover a redução da carga orgânica presente nesse efluente, seja através de processos físicos, químicos ou biológicos (VON SPERLING, 2014).

Ao longo do tratamento de esgoto diversos tipos de resíduos são gerados, os quais necessitam receber um tratamento adequado antes de seu destino final. Entretanto, é o lodo, o resíduo que apresenta a maior importância mesmo representando apenas de 1 a 2% do volume do esgoto tratado. Para tratar esse resíduo são necessários grandes investimentos em equipamentos, acrescidos dos custos operacionais associados, que podem representar até 50% de todo custo de operação da estação (ANDREOLI et al , 2001; SPINOSA et al., 2011).

Os principais aspectos indesejáveis são: instabilidade biológica, pois normalmente parte do lodo gerado se compõe de material biodegradável e essa fração for muito alta o lodo torna-se putrescível; baixa qualidade higiênica, pois é um material com uma grande quantidade de microrganismos patogênicos que constituem ameaça a saúde pública da população (ANDREOLI et al , 2001).

O lodo gerado ao longo dos processos de tratamento é basicamente constituído de materiais orgânicos (sólidos voláteis), minerais (sólidos fixos) e água. Suas características são bastante variáveis e dependem de fatores como o tipo de esgoto que é proveniente e as peculiaridades dos processos de tratamento utilizados. Essa variedade em suas características é o que muitas vezes dificulta o

seu manejo e sua disposição final, criando a necessidade de submetê-lo a diversas etapas unitárias de tratamento (JORDÃO; PESSÔA 2014).

Determinar a produção de lodo ao final do tratamento de esgoto doméstico é um fator fundamental na avaliação de um projeto de estação de tratamento. O cálculo para avaliar a viabilidade econômica de uma estação de tratamento de esgoto (ETE) está diretamente ligado com a quantidade de lodo produzido que refletirá nos custos de tratamento, transporte e destino final desse material.

3.1.2. Classificação de lodos gerados em ETE

Segundo Andreoli et al., (2006) para os processos convencionais de tratamento de esgoto, o lodo gerado ao longo das etapas é classificado conforme a fase de tratamento onde foram originados. A classificação pode ser feita em lodo primário, lodo secundário e químico podendo ser digerido ou não.

O lodo primário é aquele removido dos decantadores primários. Apresenta características que são variáveis e dependem do grau de adensamento que é proporcionado nos decantadores. Possui uma concentração de sólidos secos variando entre 2 e 6% e sua produção é da ordem de 35 g SS/(hab.dia) a 40 g SS/(hab.dia) (ANDREOLI, 2001).

O lodo primário é altamente putrescível, o que gera maus odores. Além disso, apresenta uma grande quantidade de microrganismos, que podem causar diversos tipos de doenças caso entre em contato com o ser humano (DAVID, 2002).

O lodo secundário pode ser definido como aquele originado através dos processos de conversão biológica em tratamento por lodo ativado e posteriormente separado através de decantadores secundários (JORDÃO; PESSÔA, 2014). Esse lodo é a própria biomassa que cresceu à custa do alimento fornecido pelo esgoto doméstico. Apresenta uma concentração de sólidos secos variando entre 0,6 e 1% e a sua produção é da ordem de 25 g SS/(hab.dia) a 35 g SS/(hab.dia) (ANDREOLI, 2001).

3.1.3. Etapas de tratamento de lodo em ETE

Para o tratamento do lodo é necessário um conjunto de etapas de tratamento que podem ser classificadas em: processos de adensamento, processos de estabilização, processos de desaguamento/desidratação, processos de higienização e destino final (VON SPERLING, 2014). A escolha da melhor alternativa de tratamento do lodo deve levar em consideração uma série de fatores que envolvem aspectos econômicos e ambientais (BASERBA et al., 2014).

Assim as etapas de tratamento de lodo visam de uma forma geral reduzir o teor de material biodegradável, promover a higienização desse material e reduzir a quantidade de água presente no mesmo a níveis que possibilitem sua manipulação sem oferecer riscos à saúde e facilitem o transporte além de reduzir seus custos associados (ANDREOLI et al., 2006).

3.1.3.1. Adensamento

O adensamento consiste basicamente em reduzir o volume a ser processado para as demais etapas e também facilitar o manuseio e o processamento desse material, além de reduzir as dimensões das unidades subsequentes do tratamento. A redução de volume ocorre através da remoção parcial da quantidade de água contida que é caracterizada pelo seu grau de umidade (JORDÃO; PESSÔA 2014). Esses processos ocorrem por meio dos adensadores que podem ser do tipo gravidade ou flotação de ar dissolvido (Tabela 1) entre outros (ANDREOLI, 2001).

Tabela 1: Tipos de adensamento de lodo

Tipo de adensador	Origem do lodo	Teor de sólidos (%)	
		Faixa usual	Valor Típico
Gravidade	Lodo primário Bruto	4 a 10	6,0
	Lodo Misto	2 a 6	4,0
Flotação	Lodo ativado	3 a 6	4,0

Fonte: Adaptado de ANDREOLI et al., (2001).

3.1.3.2. Estabilização

A estabilização de lodos consiste em estabilizar a fração biodegradável da matéria orgânica, reduz assim, os riscos de degradação desse material e a quantidade de microrganismos patogênicos (VON SPERLING, 2014).

Segundo Andreoli et al (2001) são três os tipos de estabilização de lodo: biológica, química e térmica. A primeira consiste na utilização de microrganismos específicos tendo como objetivo realizar a estabilização da fração orgânica em material estável, além disso, promove a destruição de microrganismos patogênicos presentes nesse material.

Em Andreoli et al (1999) é feita a diferenciação dos processos biológicos de estabilização nas seguintes modalidades:

Digestão Anaeróbia: É o processo onde diversos grupos de organismos anaeróbios e facultativos, assimilam e destroem a matéria orgânica. Em geral os sólidos em suspensão, fixos e voláteis, são removidos da massa líquida do afluente a ETE e encaminhados para seu processamento em digestores, reatores biológicos ou biodigestores, onde será decomposto anaerobicamente.

Digestão Aeróbia: É o processo onde grupos de organismos, na presença de oxigênio, fazem a oxidação dos sólidos biodegradáveis contidos nos esgoto, favorecendo a atividade biológica aeróbica na formação do lodo digerido do gás carbônico e água.

A estabilização química segundo Jordão e Pessoa (2014) é aquela utilizada através da adição de produtos químicos alcalinos que são capazes de elevar o pH do lodo a 12, por pelo menos 2 horas, impedindo ou retardando a ação dos microrganismos presentes no lodo que iriam consumir a matéria orgânica presente no material e que poderiam causar maus odores. A utilização desse método de estabilização possui a desvantagem de aumentar os custos operacionais da ETE devido ao aumento do volume de lodo a ser transportado para seu destino final, uma vez que passa a incluir na sua parcela a massa de produto químico utilizado.

Por fim, a estabilização térmica é obtida pela introdução de calor proveniente de fontes diversas sobre a fração volátil em ambientes fechados (Tabela 2). A principal vantagem na utilização da estabilização

térmica é a obtenção de um produto final com alto teor de sólidos, livre de microrganismos patogênicos, o que favorece a sua utilização na agricultura (ANDREOLI et al., 2001).

Tabela 2: Forma de estabilização e métodos de aproveitamento ou disposição final

Processo de tratamento	Uso ou método de disposição final
Biológico (digestão anaeróbia/aeróbia)	Produz biossólido apto para ser utilizado com restrições na agricultura, especialmente condicionador de solo e fertilizante orgânico.
Química	Utilizado na agricultura ou cobertura de aterro sanitário
Térmica	Produto final de elevado teor de sólidos com significativa concentração de nitrogênio, livre de patógenos podendo ser utilizado na agricultura sem restrições.

Fonte: Adaptado de ANDREOLI et al., (2001).

3.1.3.3. Desidratação

A desidratação de lodos é utilizada para reduzir uma grande quantidade de água presente nesses materiais. Segundo Andreoli et al., (2001) a capacidade de desidratação de lodo está diretamente relacionada ao tipo de sólido e a forma pela qual a água está ligada as suas partículas no lodo.

Andreoli et al., (2006) também destaca as principais vantagens na realização da desidratação: redução no custo de transporte para disposição final; melhoria nas condições de manejo do lodo facilitando as condições de transporte; aumento do poder calorífico do lodo, por meio de redução da umidade presente; redução do volume final de lodo para disposição final.

Os processos de desidratação do lodo podem ocorrer em meios naturais ou de forma mecanizada, cada um obtendo um diferente teor de sólidos ao final. A principal diferença entre os processos é que naquele

realizado em meios naturais a remoção é feita pela evaporação da água, ocorrendo assim de forma mais lenta necessitando um longo tempo de exposição do material as condições de secagem. Sendo assim os processos em meio natural necessitam de maiores requisitos de área e de condições climáticas favoráveis ao seu processo (VON SPERLING, 2014).

Entre os processos naturais os mais utilizados são os leitos de secagem que em geral são constituídos em formato de tanques retangulares, projetados para receber o lodo de digestores aeróbios ou anaeróbios. Nesse local ocorre a redução da umidade com a drenagem e evaporação da água que é liberada no período de secagem. Entretanto, esses processos são recomendados apenas em estações de pequeno porte devido à necessidade de grandes áreas para sua instalação (JORDÃO; PESSÔA, 2014).

Os processos mecânicos são baseados na compactação ou de centrifugação desse material ocorrendo assim de forma acelerada. Esse processo é mais indicado quando os requisitos de áreas são mais limitados ou as condições climáticas não são favoráveis. Em geral, em estações de tratamento de médio ou grande porte, adotam-se processos mecanizados no tratamento de lodo (JORDÃO; PESSÔA, 2014).

Entre os processos mecânicos destaca-se o método da centrifugação que consiste na separação sólido-líquido do lodo através da força centrífuga, onde os sólidos mais pesados são carregados até as paredes internas do tambor, enquanto a fase líquida escoar para a extremidade oposta de onde é retirado. Os sólidos separados são então arrastados pela ação de um “parafuso sem fim” para a extremidade cônica de onde são igualmente retiradas como “torta seca” (ANDREOLI et al, 2001).

Andreoli et al., (1999) destaca que as centrífugas são uma das alternativas mais adequadas para desidratação de lodos, devido principalmente a sua fácil operação e boa consistência final do material desidratado (entre 20-30% de sólidos).

3.1.3.4. Higienização

O lodo possui diversos agentes patogênicos, partes desses agentes são removidas com a precipitação da matéria orgânica. Após a estabilização e redução do volume do lodo, tem-se um material com

menor potencial patogênico. Entretanto, muitos outros parasitas intestinais e seus ovos são pouco afetados nos processos convencionais de tratamento (VON SPERLING, 2014).

Por essa razão é necessário uma etapa adicional ao tratamento, chamada de higienização que pode ser realizada por via térmica, química, biológica ou até mesmo por meio da radiação solar que busca reduzir o potencial patogênico a níveis aceitáveis, que não possam trazer riscos a saúde humana (ANDREOLI et al., 2001).

Entre as principais formas de higienização de lodos destacam-se: a compostagem que elimina os agentes patogênicos pelo efeito da temperatura e pelo tempo de exposição do material; a calagem que associa o efeito da ação de altos níveis de pH associados ao calor gerado pelas reações químicas no processo de hidratação da cal; e a secagem que reduz os agentes patogênicos pela exposição ao raios solares ou ao calor (ANDREOLI et al., 2006).

3.2. Disposição final e formas de aproveitamento do lodo

3.2.1. Disposição de lodo em aterro sanitário

No Brasil, a principal forma de destino do lodo de esgoto tratado é a disposição final em aterros sanitários, seguida de algumas iniciativas de compostagem e secagem térmica, todas sem grande expressividade (MICELI et al., 2014).

A técnica de disposição final em aterros sanitários conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da NBR 8419 é definida como “... técnica de aplicação de resíduos sólidos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais”.

Nesse tipo de disposição não ocorre nenhuma forma de aproveitamento ou recuperação do lodo, ele é apenas destinado aos aterros sanitários onde será disposto em células, nas quais passará por processos de biodegradação, gerando outros subprodutos gasosos (LIMA, 2010).

Segundo Andreoli et al., (2001) existem duas modalidades de disposição final de lodo gerado em ETE. A primeira é a disposição final em aterros sanitários exclusivos onde somente o lodo é disposto nesse local; a segunda que é a mais usual, seria a co-disposição com outros

resíduos urbanos, onde o lodo é misturado com os demais materiais. O principal inconveniente dessa última alternativa é a redução da vida útil dos aterros sanitários, o que a torna inviável a longo prazo, seja pela saturação da capacidade dos aterros sanitários ou pelo custo elevado de novas áreas que atendam os requisitos técnicos necessários para sua implantação.

3.2.2. Uso de lodo na agricultura

A aplicação de lodo de esgoto em áreas de produção agrícola é uma prática bastante recomendada, desde que sejam adotados controles rígidos quanto aos cuidados exigidos no tratamento do lodo e que atendam os requisitos exigidos em norma (ANDREOLI et al., 1999).

No Brasil, é a Resolução N°375, de 30 de agosto de 2006, do CONAMA (Conselho nacional de meio ambiente) que define os critérios a serem seguidos para utilização do lodo para o uso agrícola. A resolução considera que o lodo deve ser caracterizado por diversos indicadores, entres eles: potencial agronômico, existência de substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas, indicadores bacteriológicos, presença de agentes patogênicos e estabilidade do lodo. Essa norma também especifica que nenhum tipo de lodo deve ser utilizado em solos cuja parte comestível do alimento entre em contato com o solo.

O lodo, também denominado de biossólido quando suas características forem adequadas para utilização agrícola, pode ser classificado em Classe A e Classe B. Os biossólidos enquadrados na Classe A são de uso irrestrito, pois possuem níveis de agentes patogênicos abaixo da quantidade mínima detectável. Os da Classe B são aqueles que possuem seu uso restrito a cultivos de café, silvicultura e culturas para produção de fibras e óleos. Nessa ultima classe é assegurado que a quantidade de microrganismos se encontra a níveis que não possam causar danos a saúde pública e ao meio ambiente (BRASIL 2006).

3.2.3. Incineração

O objetivo principal da incineração do lodo é promover a sua redução volumétrica através da conversão dos sólidos fixos em cinzas e

dos sólidos voláteis em gás carbônico, água e dióxido de enxofre. As cinzas após seu resfriamento podem ser destinadas a aterros sanitários ou até mesmo serem aproveitadas como agregados na construção civil. (MACHADO, 2011).

Esse tipo de processo ocorre em temperaturas na ordem de 1000° C e a principal fonte de combustível é o próprio poder calorífico dos sólidos voláteis. Dependendo da necessidade de energia, outras fontes como biogás e o gás natural também podem ser utilizadas para complementar o processo de queima.

Os gases quentes que são emitidos no processo de incineração podem ser aproveitados na própria estação de tratamento seja para aquecimento de fluidos, via trocadores de calor ou através da geração de vapor em unidades de aproveitamento de energia térmica (JORDÃO; PESSÔA, 2014).

3.3. Tecnologias de tratamento de efluentes domésticos

3.3.1. Lodos Ativados

O sistema de tratamento por Lodos Ativados é o processo biológico onde o esgoto afluente e o lodo ativado (flocos produzidos no esgoto bruto ou decantando pelo crescimento de bactérias ou outros organismos, na presença de oxigênio dissolvido) são intimamente misturados, agitados e aerados em unidades chamadas de tanques de aeração, para que posteriormente o lodo ativado seja separado do efluente por processo de sedimentação (JORDÃO; PESSÔA, 2014).

Esse tipo de sistema é bastante utilizado mundialmente, em especial quando se deseja uma elevada qualidade do efluente final com baixo requisito de área para o tratamento. Entretanto, essa forma de tratamento exige uma maior complexidade nos aspectos operacionais (VON SPERLING, 2012).

O sistema de lodos ativados possui uma diversidade de variantes que podem ser definidas de acordo com a idade do lodo, são elas: lodos ativados convencional e lodos ativados de aeração prolongada; também pode ser definidos de acordo com seu fluxo: fluxo contínuo ou fluxo intermitente.

No processo de lodos ativados convencional, com a finalidade de economizar energia utilizada na aeração e reduzir o volume do reator

biológico, uma parte da matéria orgânica seja ela em suspensão ou sedimentável é retirada antes de chegar ao tanque de aeração, através do decantador primário (VON SPERLING, 2012).

3.3.2. Reatores UASB

Os reatores UASB foram originalmente desenvolvidos na Holanda. Sua aplicação é feita em grande escala no tratamento anaeróbio de esgoto, transformando em subprodutos como lodo, água e gases entre eles os principais são: o gás carbônico e metano. Seu princípio de funcionamento consiste em três partes fundamentais: leito de lodo, zona de sedimentação e separador trifásico (CHERNICHARO, 2007).

Ao entrar pelo fundo do reator, o efluente passa, de forma ascendente, através de um leito de lodo denso e de elevada atividade onde ocorrerá a digestão anaeróbia. O fluxo ascendente e a presença de bolhas resultam na mistura do efluente com o lodo, ocorrendo, assim, a degradação da matéria orgânica. Assim, tem-se a produção de biogás e o crescimento da biomassa bacteriana. Após a passagem pelo leito e manta de lodo, o biogás gerado e o líquido seguem em fluxo ascendente até o separador trifásico, enquanto que a biomassa gerada sedimentará para o fundo do reator. Os gases são direcionados ao separador trifásico pelo defletor de gases e os sólidos que acabaram sendo carregados pelas bolhas de gases através da manta de lodo, ao sedimentar no decantador, retornam à câmara de digestão (CHERNICHARO, 2007).

3.4. Secagem Térmica de Lodo

3.4.1. Conceitos gerais

O processo de secagem térmica pode ser definido como: “O processo de remoção de substâncias voláteis (umidade) de um material seja ele sólido ou líquido, pela existência de uma diferença de gradientes de umidade e de temperatura entre o meio do qual a umidade é removida para o meio para qual é transferida” (LOBATO, 2011).

Andreoli et al., (2006) define que no processo de secagem térmica ocorre a redução da umidade do lodo através da perda de água por evaporação e da destruição de microrganismos. Nesse processo é

removida apenas a quantidade de água do material e a maior parte dos sólidos totais permanece inalterada.

Durante o processo de secagem térmica devem ocorrer dois processos simultâneos. O primeiro é o que consiste na evaporação da umidade da parte superficial do lodo, que ocorre através da transferência de energia. O segundo é a transferência da umidade do lodo para sua superfície e sua consequente evaporação pelo primeiro processo (MUJUMDAR, 2006).

Entre os principais benefícios da utilização da secagem térmica destacam-se: redução significativa do peso e volume do lodo, com consequente redução dos custos de transporte e disposição final desse material; e a destruição de organismos patogênicos presente no lodo (FRANÇA JUNIOR, 2008). Outra vantagem da aplicação de processos de secagem térmica é a possibilidade de reduzir etapas no tratamento de lodo, pois os processos térmicos também promovem a estabilização e higienização desse material (BUX et al , 2001).

A principal desvantagem da secagem térmica são seus elevados custos de investimento e operacionais. Sua utilização é viável em casos onde a viabilidade econômica seja obtida pela redução do volume a ser disposto, o que reduz os custos de transporte e disposição final ou quando é necessária a produção de um lodo livre de patógenos para sua utilização, como fertilizante agrícola ou condicionador de solo (JORDÃO; PESSÔA, 2014).

3.4.2. Formas de transferência de calor

A forma de transferência de energia ocorrida nos processos de secagem térmica ocorre por resultado de condução (secagem indireta), processos convectivos (secagem direta), por radiação ou por uma combinação entre eles (DAVID, 2002).

3.4.2.1. Processo de Secagem por Convecção

Nesse processo o calor é transferido para o material através do agente de secagem (ar aquecido) que passa sobre ou através do sólido, fazendo com que a umidade seja transportada para fora do meio de secagem (PARK et al , 2007).

3.4.2.2. Processo de Secagem por Condução

O processo de secagem por condução o calor é fornecido pelo contato do lodo com uma parede que separa o material do meio de transferência de calor que em geral pode ser um óleo térmico ou vapor (DAVID, 2002).

3.4.2.3. Processo de Secagem por Radiação

O processo de secagem por radiação é aquele onde é promovida a transmissão do calor radiante para o lodo, sem haver o contato do lodo com gases provenientes de combustão (PARK et al , 2007).

3.4.3. Consumo de energia térmica

Para avaliar um sistema de secagem térmica o principal parâmetro a ser considerado, é a energia necessária para evaporação da água presente no lodo. Segundo Andreoli et al (2001) em condições ideais são necessários 2.744 KJ (0,76 kWh) de energia para evaporar 1 Kg de água presente no lodo, esse valor pode chegar até o dobro dependendo das condições operacionais. Segundo David e Tsutiya, (2002), de um modo geral, os equipamentos de secagem térmica necessitam para evaporar a água contida no lodo de 800 a 1.000 kcal/kg de água evaporada. A demanda de energia necessária também irá depender da eficiência dos equipamentos utilizados no processo de secagem, bem como as características do lodo processado.

3.4.4. Classificação dos secadores térmicos

Os métodos de transferência de calor também podem ser classificados como: métodos indiretos, diretos, radiantes ou mistos. Nos secadores diretos o ar quente entra em contato direto com o lodo e a transferência de calor se dá por convecção. Nos indiretos, a transferência de calor ocorre por condução através do contato do lodo com superfícies aquecidas por: ar quente, vapor ou óleo térmico. Nos secadores radiantes ou infravermelhos, a troca de calor se dá por radiação (DAVID, 2002). Na tabela 3, são apresentadas as características principais desses dois tipos de secadores.

Tabela 3: Características de secadores diretos e indiretos

Secador direto	Secador indireto
<ul style="list-style-type: none"> • Contato direto dos gases quentes com os sólidos, para aquecê-los e remover a água neles presente. 	<ul style="list-style-type: none"> • O calor é transferido ao material úmido mediante a condução numa parede metálica.
<ul style="list-style-type: none"> • As temperaturas de secagem podem atingir 750°C. 	<ul style="list-style-type: none"> • As temperaturas das superfícies podem ultrapassar 540°C, no caso dos secadores aquecidos pelos produtos de combustão.
<ul style="list-style-type: none"> • Nas temperaturas do gás abaixo do ponto de ebulição, o teor de vapor no gás influencia a velocidade de secagem e o teor final de umidade no sólido. Com as temperaturas do gás acima do ponto de ebulição, o teor de vapor do gás tem um pequeno efeito retardador sobre a velocidade de secagem e o teor final de umidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • São convenientes para secar sob pressão reduzida e em atmosferas inertes, com o objetivo de permitir a recuperação de solventes e impedir a ocorrência de misturas explosivas ou a oxidação de materiais que se decompõem com facilidade.
<ul style="list-style-type: none"> • Quanto mais baixo for o teor final de umidade, maior será o consumo de combustível por m³ evaporado. 	<ul style="list-style-type: none"> • A recuperação de poeira e de material pulverulento pode ser efetuada de maneira mais satisfatória.
<ul style="list-style-type: none"> • A eficiência aumenta com o aumento da temperatura do gás afluente. 	<ul style="list-style-type: none"> • O fato de não acontecer contato direto do meio de secagem e o lodo, constitui uma vantagem quanto à geração de gases e odores.
<ul style="list-style-type: none"> • Devido à necessidade de grandes volumes de gás para fornecer todo o calor, o equipamento de coleta de poeira pode ser muito grande e caro, quando se operam sólidos em pequenas partículas. 	

Fonte: Perry & Green (1997) *apud* Lobato (2011).

Em relação ao modo de operação os secadores térmicos podem ser classificados em contínuo ou em batelada, o sistema de secagem de lodo deve ser escolhido conforme a quantidade de material a ser processado. Park *et al.*, (2007) indica a operação em batelada para uma taxa de geração de material a ser seco entre 20 a 50 kg/h. Na faixa de 50 a 1.000 kg/h podem ser adotados os dois modos de operação, enquanto a taxa for superior a 1.000 kg/h, deve-se optar por secadores contínuos.

3.4.5. Tecnologias de secagem térmica

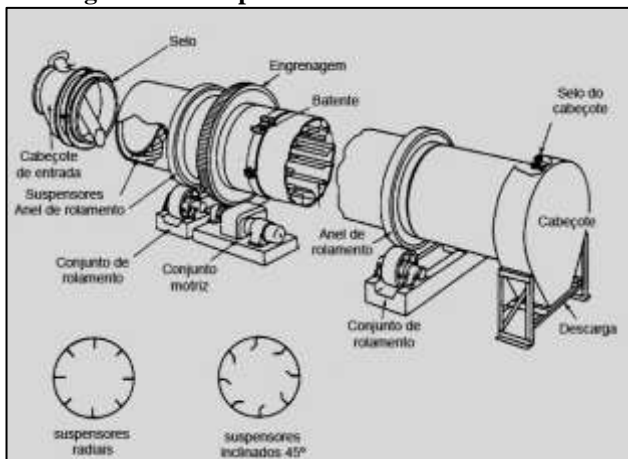
Entre as tecnologias de secagem térmica de lodo, destacam-se as tecnologias de secadores rotativos (diretos e indiretos), de esteira (túnel), de múltiplas bandejas e plantas de secagem solar (DAVID, 2002; METCALF e EDDY 2003; ANDREOLI *et al* 2006; LOBATO 2011).

3.4.5.1. Secadores Rotativos

Os secadores rotativos são aqueles onde o processo de secagem ocorre em cilindros horizontais, levemente inclinados, nos quais o material a ser secado é introduzido na parte superior e progride até a outra extremidade, seja pela ação da gravidade ou por pás direcionadoras que são dispostas ao longo das paredes interna do cilindro rotativo (Figura 1).

Os secadores rotativos podem ser divididos em diretos e indiretos, essa classificação é feita baseada na forma como ocorre à transferência de calor. É considerado direto quando o calor é trocado diretamente entre o gás e os sólidos e indiretos quando o chamado meio de aquecimento é separado do contato do material por meio de outro cilindro, assim o calor é transmitido através da superfície do cilindro e não através do contato direto.

Figura 1: Exemplo de Secadores Rotativos



Fonte: WEF, 1992 apud Andreoli et al , 2006.

3.4.5.1.1. Secadores rotativos diretos

Esse processo ocorre com a introdução do ar de secagem a temperaturas próximas a 500°C, o que permite a evaporação da umidade do lodo. Segundo Lobato, (2011) o lodo que foi desaguado mecanicamente até chegar a teores de sólidos entre 25 e 40% é misturado com o lodo resultante do processo de secagem com o intuito de aumentar o teor de sólidos do lodo afluyente ao secador para 40 a 50%.

O lodo afluyente percorre então pelo secador até sua extremidade de descarga, sendo auxiliado pelas aletas axiais que são instaladas ao longo das paredes internas do cilindro rotativo. Essas aletas são responsáveis por realizar o revolvimento do material, criando assim uma fina camada de partículas de lodo que irão secar rapidamente quando entrarem em contato com o gás quente presente no sistema rotativo (DAVID, 2002).

3.4.5.1.2. Secadores rotativos indiretos

Nesse processo o cilindro principal, onde está presente o lodo, é protegido por outro cilindro. Entre os cilindros circula o chamado meio de secagem, o qual transmite o calor para o lodo através da superfície do cilindro. Esse meio de secagem em geral é composto por vapor ou óleo térmico à temperatura em torno de 250°C (ANDREOLI et al , 2006).

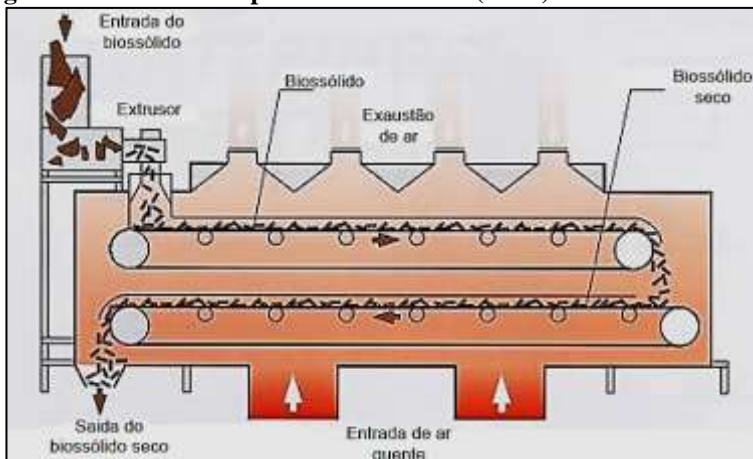
Nos secadores indiretos horizontais a carcaça contém no seu interior um agitador rotativo composto de uma série de elementos (discos, aletas ou pás) montados em um eixo rotativo (rotor). O eixo e os agitadores, geralmente ocultos, permitem que o meio de secagem circule através de seu núcleo, o que possibilita o aquecimento das paredes que estão em contato com o lodo. Dessa forma, os agitadores não só transportam o lodo através do secador, mas também proporcionam uma superfície de transferência de calor que entra em contato com o lodo (DAVID, 2002).

3.4.5.2. Secadores tipo esteira (Túnel)

Os secadores do tipo esteira são aqueles onde o material passa por um sucessivo processo de secagem através da circulação constante de ar quente. Nesse processo o lodo úmido introduzido é transportado lentamente sobre a superfície da esteira transportadora, que se desloca dentro da câmara de secagem (ANDREOLI et al , 2006).

O calor é diretamente aplicado através de uma série de ventiladores que insuflam o ar quente à temperatura de aproximadamente 150°C sobre o lodo que está sendo processado, o qual é conduzido de forma lenta por meio do túnel de aquecimento (Figura 2).

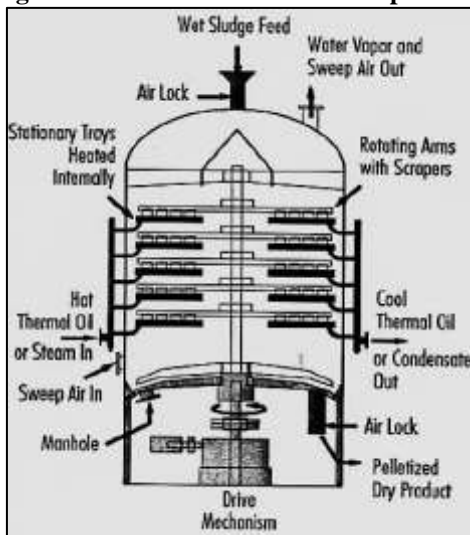
Figura 2: Secador transportador de esteira (túnel)



Fonte: Catálogo, Netzsch 1999 apud Andreoli et al., 2006

3.4.5.3. Secadores de soleiras múltiplas

Os secadores do tipo múltiplas bandejas são aqueles constituídos por uma câmara cilíndrica na posição vertical, que contém em seu interior uma série de soleiras estacionárias, dispostas horizontalmente. O processo de transferência de calor nesse tipo de secador é realizado de forma indireta, sendo transferido para as soleiras que em contato com o lodo promovem o seu aquecimento (Figura 3). Após a secagem, o material é descarregado na sua parte inferior do secador em uma tremonha e transportado para silos de armazenamento (ANDREOLI et al., 2002).

Figura 3: Secador de soleiras múltiplas

Fonte: Andreoli et al , 2006

3.4.5.4. Planta de Secagem Solar

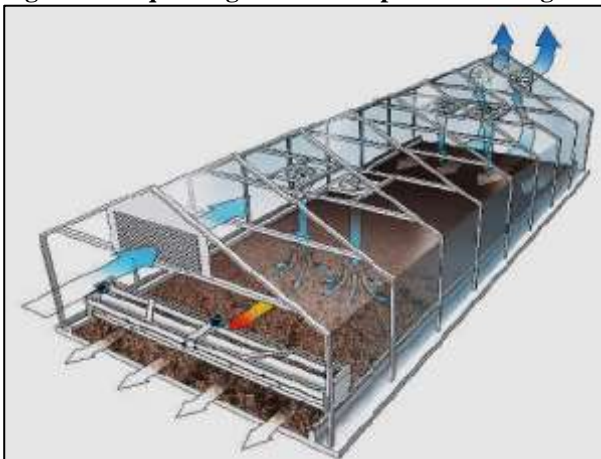
A tecnologia que utiliza a radiação solar e o potencial do ar ambiente é a planta de secagem solar. Esse tipo de tecnologia não utiliza obrigatoriamente outra forma de energia para a realização da secagem do lodo (Figura 4).

Entre as vantagens da utilização da planta de secagem solar, destaca-se: reduzido consumo de energia elétrica, quando comparado com os processos tradicionais de secagem; reduzido custo operacional associado e a obtenção de um produto final com alto teor de sólidos, que pode ser aplicado para fins diversos. Outra vantagem é que existe a possibilidade de associar planta de secagem solar com outras fontes de calor, como exemplo, a utilização do calor residual originado de processos de cogeração de energia elétrica e térmica. Dessa forma, é possível reduzir o tamanho das plantas de secagem solar, quando comparada com as que não utilizam outras fontes de calor (BUX et al , 2001).

Entretanto, esse processo de secagem possui algumas desvantagens entre elas destacam-se: a necessidade de grandes áreas

para instalação das plantas de secagem e as variações climáticas que influenciam no desempenho de secagem ao longo do ano especialmente em regiões mais frias (BUX et al , 2001).

Figura 4: Esquema geral de uma planta de secagem solar



Fonte: Catalogo HUBER, (2015).

3.5. Casos de secagem térmica de lodo no Brasil

Um dos casos de secagem térmica no cenário nacional é o da na ETE de Montes Claros, Minas Gerais, que possui um equipamento de secagem térmica de lodo do tipo tambor rotativo que trabalha de forma combinada por meio de secagem direta (convecção) e indireta (condução) (LOBATO, 2011). O lodo líquido é descartado dos RAFA (Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente), com um teor de sólidos de 3%, é desidratado numa centrífuga atingindo a concentração de 25% de sólidos. A partir daí é encaminhado para o secador térmico, onde é submetido a temperaturas de 350°C, num período de 30 minutos, convertendo-se em material granular esterilizado (COPASA, 2011).

A secagem térmica de lodo também foi adotada no Programa de despoluição da Baía de Guanabara pela CEDAE que utiliza secadores térmicos rotativos em algumas de suas estações tais como ETE Ilha Governador (1.000 L H₂O/hora); ETE Sarapuí e ETE Pavuna (4.000 L

H₂O/hora); ETE São Gonçalo e Barra da Tijuca (2.000 L H₂O/hora) (JORDÃO; PESSÔA, 2014).

Por fim, o ultimo caso destacado é o da SEMAE de São José do Rio Preto que, além de aproveitar o biogás gerado nos processos de tratamento anaeróbio, realizará a secagem térmica utilizando um secador rotativo que além de utilizar como combustível o próprio biogás e/ou gás GLP, permitirá a queima do lodo como complemento para geração de energia térmica (VILLANI JUNIOR et al., 2011).

3.6. Geração e aproveitamento do biogás gerado em ETE

3.6.1. Composição e características do biogás

O biogás é uma mistura de gases resultantes da digestão anaeróbia da matéria orgânica, cuja composição de cada gás constituinte em sua mistura depende: da pressão, temperatura, umidade, bem como, da concentração de metano e de gases inertes e/ou ácidos (Tabela 4). De um modo geral a mistura de gases componentes do biogás é essencialmente constituída de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) (COSTA, 2006).

Tabela 4: Composição típica dos gases constituintes do biogás

Compostos químicos	% de Volume do biogás gerado
Metano (CH ₄)	50 – 80 %
Dióxido de Carbono (CO ₂)	20 – 40 %
Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S)	1 – 2 %
Água (H ₂ O)	1 – 2 %
Hidrogênio (H ₂)	1 – 2 %
Nitrogênio (N ₂)	0,5 a 2,5 %
Oxigênio (O ₂)	0,1 a 1 %
Total	100%

Fonte: Adaptado de Pecora, (2006).

O biogás em ETE é produzido principalmente em dois tipos de unidades de tratamento. A primeira é no tratamento da fase líquida em reatores anaeróbios, por exemplo, reatores UASB e a segunda no tratamento da parte sólida nos digestores de lodo (ROSA, 2013).

3.6.2. Estimativa de produção de biogás em ETE

Segundo Metcalf e Eddy (2003), para o tratamento anaeróbio de esgoto doméstico e digestão anaeróbia de lodo aeróbio, estima-se uma produção de biogás de $0,4 \text{ m}^3 \text{ CH}_4.\text{kg DQO}^{-1}$ removida e $0,75 \text{ CH}_4.\text{kg SSV}^{-1}$ removida.

Em seu estudo Lobato (2011) desenvolveu um modelo para estimativa do balanço de massa da DQO em reatores UASB e obteve valores da produção de metano na faixa de $0,11 \text{ m}^3$ a $0,19 \text{ m}^3 \text{ CH}_4.\text{kg DQO}^{-1}$ removida.

Quando o emprego do biogás é avaliado como fonte energética, deve-se conhecer sua composição, presença de contaminantes, acidez e condições de pressão. A partir da composição do biogás também é possível conhecer o seu poder calorífico, pois, esse está diretamente relacionado com a quantidade de metano presente em sua composição (COSTA, 2006).

De uma forma geral em condições normais de temperatura e pressão o metano puro, possui um poder calorífico de $9,96 \text{ kWh/m}^3$, já para concentrações variando entre 50 e 80% possui um poder calorífico entre $4,95$ e $7,9 \text{ kWh/m}^3$ (SANTOS 2000, apud VALENTE 2015).

Alves (2000) destaca que a presença de impurezas e substâncias não combustíveis, como água e dióxido de carbono, prejudica o processo de queima do biogás, uma vez que essas substâncias absorvem parte da energia gerada no processo de combustão, ou seja, à medida que a concentração de impurezas se eleva, menor é poder calorífico do biogás.

O gás sulfídrico é outro componente que deve receber uma atenção especial, pois é um componente prejudicial na geração de energia elétrica. Esse gás interfere na qualidade do biogás e acarreta problemas de corrosão nos sistemas que utilizam o biogás. Por isso é necessário um conjunto de tratamentos para eliminar a característica corrosiva do gás sulfídrico (MACHADO, 2011).

3.6.3. Formas de transformação e utilização do biogás aplicado à secagem térmica

O biogás é considerado uma fonte renovável de energia e, portanto, sua recuperação e aproveitamento energético são vantajosos nos aspectos ambientais, sociais e econômicos (CENBIO, 2001).

3.6.3.1. Combustão direta sem aproveitamento do calor

A combustão direta sem recuperação de energia é o processo realizado por meio de queimadores (dispositivos que possibilitam a ignição e queima desses gases). Essa é a forma mais simples de transformação do biogás. Mesmo que não seja previsto o seu aproveitamento energético, essa modalidade ainda assim deve sempre existir nos locais em que é gerado biogás por motivo de segurança, para que se evitem possíveis explosões, para o controle de odores e por razões ambientais (LOBATO, 2011).

3.6.3.2. Combustão direta com aproveitamento do calor

Nesse caso o biogás é submetido à combustão, por exemplo, em câmaras de combustão onde gera gases quentes que podem ser utilizados, no processo de secagem térmica ou aquecimento de caldeiras. De acordo com Lobato (2011) na modalidade de combustão direta com geração e aproveitamento do calor é possível recuperar 80% do valor calorífico do metano em energia útil.

3.6.3.3. Cogeração de energia elétrica e térmica

A cogeração é o processo de geração simultânea de múltiplas formas de energia útil, geralmente na forma mecânica e térmica em um único sistema integrado (USEPA 2011).

Na cogeração de energia, onde o biogás é utilizado em motores de combustão interna ou turbinas, a transformação do potencial

energético do biogás em energia elétrica também gera calor residual proveniente dos processos de conversão energética. Essa energia pode ser utilizada em processos que necessitem de energia térmica, ou seja, é possível utilizar de duas formas benéficas de energia a partir de apenas uma única fonte primária de energia (JORDÃO; PESSÔA, 2014).

Segundo Salomon (2009) as principais vantagens da produção de energia elétrica pelo uso do biogás são: geração descentralizada, com a geração de energia próxima da fonte consumidora; possibilidade de lucro adicional devido à produção de energia e comercialização com companhias energéticas; redução no consumo de energia pela planta produtora; potencial de uso de processos para a cogeração de energia; redução das emissões de metano para a atmosfera.

3.7. Análise do custo do ciclo de vida (ACCV)

A análise do custo do ciclo de vida (ACCV) de um produto ou projeto é o método de cálculo da totalidade de todos os custos associados aos benefícios obtidos durante o ciclo de vida de um produto ou projeto. De um modo geral, a ACCV é uma ferramenta de gestão muito útil quando o que se pretende é reduzir ao máximo os gastos e maximizar os benefícios obtidos (PEREIRA, 2009).

3.7.1. Classificação dos custos

Os custos associados podem ser divididos em: custos de investimento (aquisição ou substituição de equipamentos), custos de manutenção e operação e custo total (que é somatório dos custos de investimento mais os custos operacionais associados ao longo do período de utilização) (PEREIRA, 2009).

3.7.2. Análise da viabilidade econômica

A análise da viabilidade econômica de um projeto consiste em fazer a estimativa de todos os gastos envolvidos durante determinado período de tempo. Para que se possa montar o fluxo de caixa relativo aos investimentos, custos e receitas e determinar algum indicador econômico que auxilie concluir sobre a viabilidade do projeto (LINDEMEYER, 2008).

3.7.2.1. Método do valor presente líquido (VPL)

O método do valor presente líquido (VPL) é considerado exato e consiste em trazer para o tempo presente, após a definição de uma taxa de juros, os valores obtidos a partir do fluxo de caixa dos custos e benefícios ao longo de um período de análise (PEREIRA, 2009).

4. METOLOGIA

O presente trabalho consiste na análise de alternativas de sistema de secagem térmica do lodo gerado em duas diferentes estações de tratamento, dimensionadas para atender uma população de 100.000 habitantes. Para melhor compreender a secagem térmica de lodo como alternativa de tratamento, realizou-se uma revisão bibliográfica com o auxílio de livros-texto, artigos científicos e trabalhos de pesquisa.

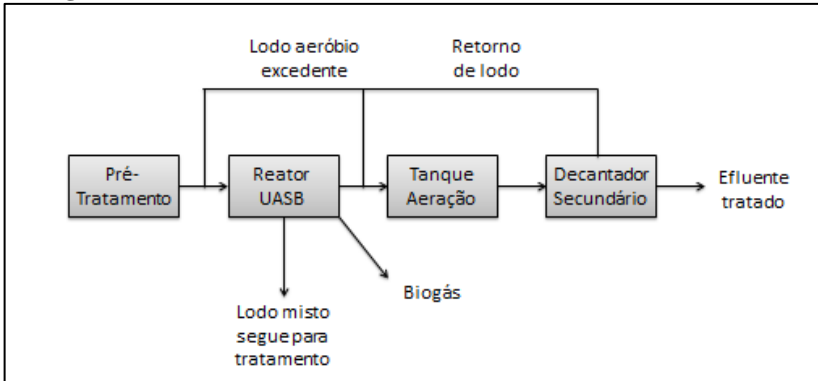
Com a finalidade de aperfeiçoar a análise são propostos diferentes cenários para o aproveitamento energético do biogás e a utilização de diferentes equipamentos de secagem térmica.

Foi realizada a avaliação dos custos totais de cada alternativa (ao longo do ciclo de vida do projeto), ao considerar os custos de implantação e substituição dos sistemas, custos operacionais (operação e manutenção dos equipamentos), custos energéticos e os custos com disposição final de lodo em aterro sanitário.

4.1 Descrição das estações de tratamento avaliadas no trabalho

4.1.1 ETE 1 - Reator UASB seguido por lodo ativado convencional

A ETE 1 (UASB-LAC) é um sistema de tratamento de efluentes composto por um reator UASB seguido de lodo ativado convencional (Figura 5). O lodo excedente produzido no tanque de aeração será encaminhado para o reator UASB onde será estabilizado juntamente com o lodo anaeróbio produzido no reator, formando um lodo misto que segue para posterior tratamento do lodo.

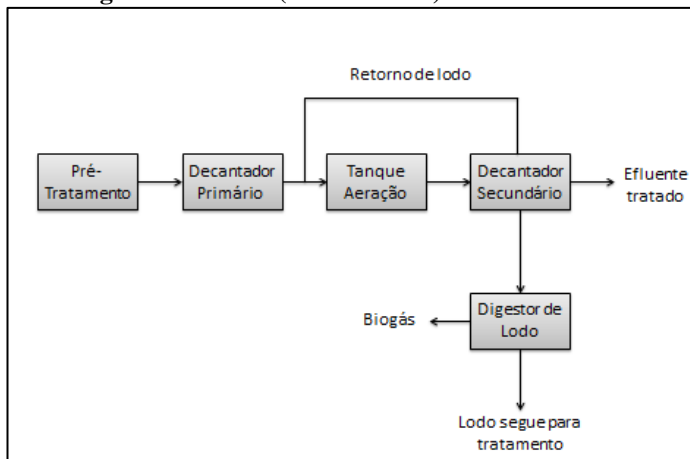
Figura 5: ETE1 - (UASB-LAC)

Fonte: autor.

4.1.2 ETE 2 - Lodo ativado convencional seguido de digestor de lodo

A proposta da ETE 2, baseia-se na utilização de um decantador primário para remoção de parcela da matéria orgânica sedimentável, seguido de lodo ativado convencional que geralmente apresenta uma idade de lodo de 4 a 10 dias (Figura 6). Como a idade de lodo é reduzida, o lodo excedente possui maior parcela de matéria orgânica e necessita de uma unidade de estabilização anaeróbia (VON SPERLING 2014). A estabilização do lodo para o caso da ETE 2 é realizada nos digestores de lodo.

Figura 6: ETE2 - (DP-LAC-DL)



Fonte: autor.

4.2 Descrição das alternativas para avaliar o sistema de secagem térmica

As alternativas avaliadas para cada estação estão descritas na tabela 5.

Tabela 5: Descrição das alternativas avaliadas para cada uma das estações de tratamento.

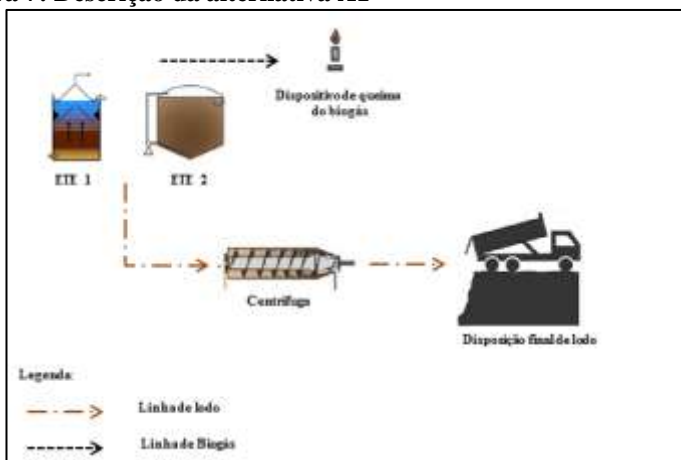
Alternativa	Caracterização das alternativas
A1	<ul style="list-style-type: none"> • Desidratação mecânica até 25% de sólidos. • Sem aproveitamento do biogás (não haverá secagem térmica). • Disposição final do lodo em aterro sanitário.
A2	<ul style="list-style-type: none"> • Desidratação mecânica até 25% de sólidos. • Aproveitamento do biogás para unidade de cogeração de energia elétrica e térmica com aproveitamento da energia térmica para secagem de lodo. • Secagem térmica até um teor de sólidos de 90%, utilizando um Secador tipo esteira. • Disposição final do lodo em aterro sanitário.
A3	<ul style="list-style-type: none"> • Desidratação mecânica até 25% de sólidos. • Aproveitamento do biogás para unidade de cogeração de energia elétrica e térmica com aproveitamento da energia térmica para secagem de lodo. • Secagem térmica até um teor de sólidos de 90%, utilizando um Secador tambor rotativo. • Disposição final do lodo em aterro sanitário.
A4	<ul style="list-style-type: none"> • Desidratação mecânica até 25% de sólidos. • Aproveitamento de todo potencial energético do biogás como combustível para queima em câmara de combustão com aproveitamento dos gases quentes para secagem térmica. • Secagem térmica até um teor de sólidos de 90%, utilizando um Secador tipo esteira. • Disposição final do lodo em aterro sanitário.
A5	<ul style="list-style-type: none"> • Desidratação mecânica até 25% de sólidos. • Aproveitamento de todo potencial energético do biogás como combustível para uma câmara de combustão com aproveitamento dos gases quentes para secagem térmica. • Secagem térmica até um teor de sólidos de 90%, utilizando um Secador tambor rotativo. • Disposição final do lodo em aterro sanitário.

A6	<ul style="list-style-type: none"> • Desidratação mecânica até 25% de sólidos. • Sem aproveitamento do biogás para secagem térmica de lodo. • Secagem térmica até um teor de sólidos de 75%, utilizando um Secador Solar. • Disposição final do lodo em aterro sanitário.
----	--

Fonte: autor.

A alternativa A1 será o cenário caracterizado como prática usual nas estações de tratamento, onde parte da umidade é removida do lodo até um teor final de sólidos que seja praticável sua disposição final em aterro sanitário (Figura 7).

Figura 7: Descrição da alternativa A1

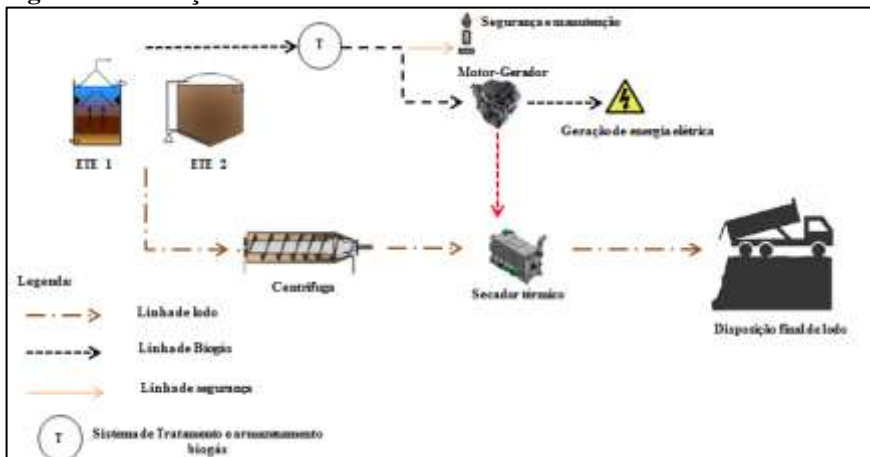


Fonte figura: autor. Imagens: Bielschowsky (2014); Jordão e Pessoa (2014) e Valente (2015).

Nas alternativas A2 e A3 será instalado um conjunto motor-gerador para produção de energia elétrica e térmica demonstrando um caso típico de cogeração, a diferença entre os casos A2 e A3 será a utilização de diferentes equipamentos de secagem térmica (Figuras 8 e 9).

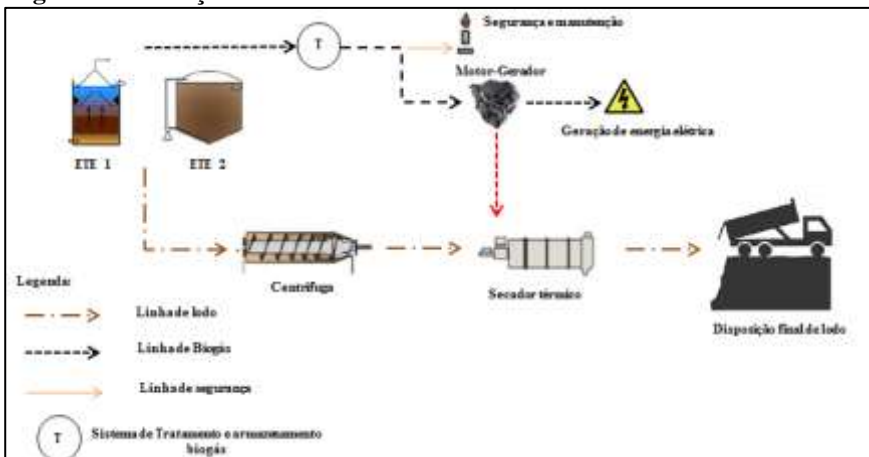
Nas alternativas A2 e A3 será instalado um conjunto motor-gerador para produção de energia elétrica e térmica demonstrando um caso típico de cogeração, a diferença entre os casos A2 e A3 será a utilização de diferentes equipamentos de secagem térmica (Figuras 8 e 9).

Figura 8: Descrição da alternativa A2



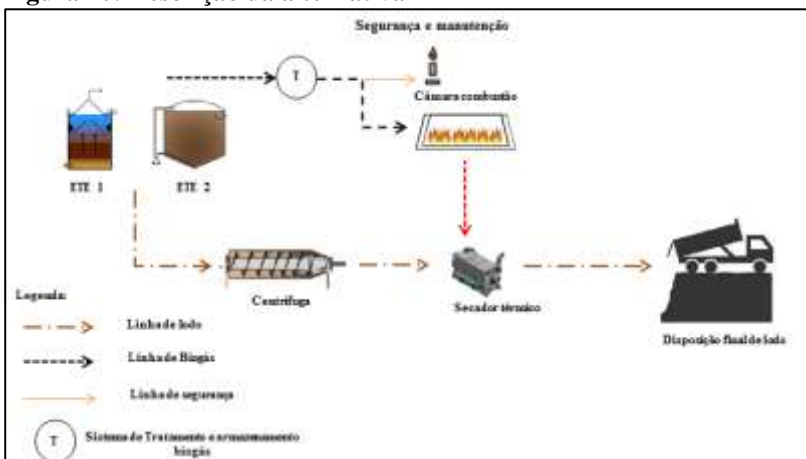
Fonte figura: autor. Imagens: Bielschowsky (2014); Jordão e Pessoa (2014) e Valente (2015).

Figura 9: Descrição da alternativa A3



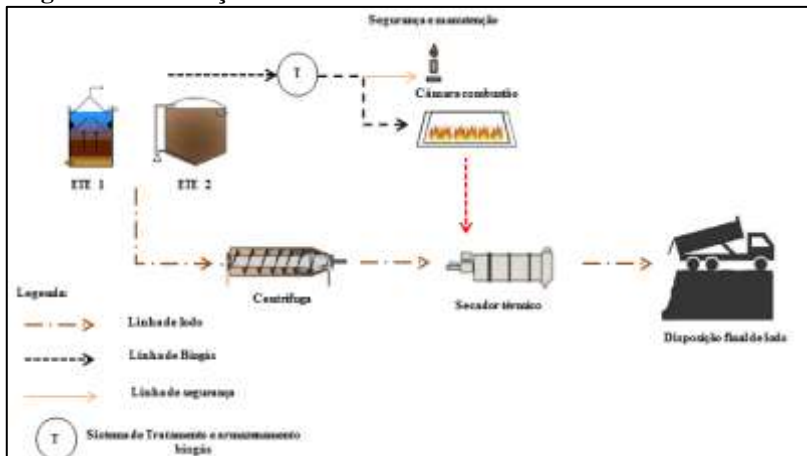
Fonte figura: autor. Imagens: Bielschowsky (2014); Jordão e Pessoa (2014) e Valente (2015).

Figura 10: Descrição da alternativa A4



Fonte figura: autor. Imagens: Rosa (2013); Bielschowsky (2014); Jordão e Pessoa (2014) e Valente (2015).

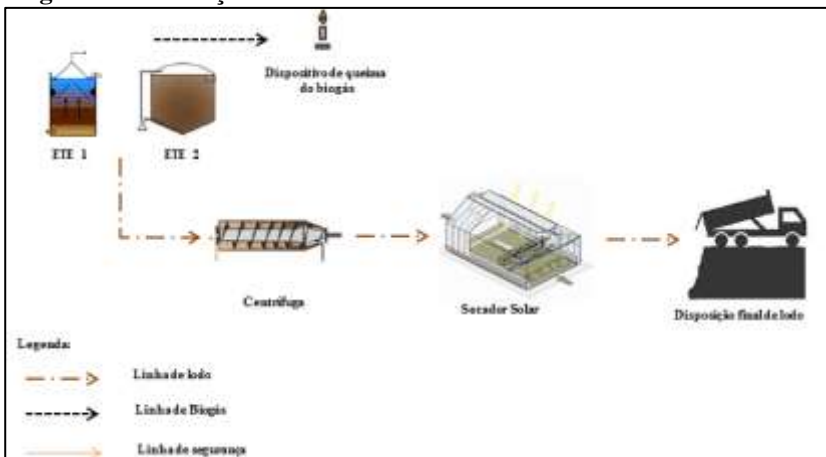
Figura 11: Descrição da alternativa A5



Fonte figura: autor. Imagens: Rosa (2013); Bielschowsky (2014); Jordão e Pessoa (2014) e Valente (2015).

Será aplicado nas alternativas A4 e A5 todo potencial energético do biogás utilizado na secagem térmica, para isso será considerada sua queima em câmara de combustão com aproveitamento da energia térmica na secagem de lodo (Figuras 10 e 11). A diferença entre os casos A4 e A5 será a utilização de diferentes equipamentos de secagem térmica.

Figura 12: Descrição da alternativa A6



Fonte figura: autor. Imagens: Bielschowsky (2014); Jordão e Pessoa (2014); Wenderwolf (2015) e Valente (2015).

Por fim, na alternativa A6 será avaliado de forma resumida um sistema de secagem solar de lodo (Figura 12), para isso levantou-se informações dos custos de equipamentos, consumo de energia elétrica dos equipamentos e a área de secagem necessária para os casos.

Na tabela 6 serão apresentados os principais dados iniciais utilizados.

Tabela 6: Dados iniciais para realização dos cálculos

Parâmetro	Notação	Valor	Unidade	Fonte
Custo com disposição final em aterro sanitário				
T.S \geq 60%	Cdf	90,0	R\$/T	Bielschowsky (2014)
30% < T.S < 60%		110,0		
T.S \leq 30%		160,0		
Produção e características do lodo				
Produção total diária de lodo ETE 1	P (lodo)	2.918	Kg SST/d	-
Produção total diária de lodo ETE 2	P (lodo)	3.805	Kg SST/d	
Massa específica do lodo	(γ)	1.000	Kg/m³	Adotado
Teor de sólidos secos (pós-centrífuga)	TS (inicial)	25,0	%	Adotado
Teor de umidade no lodo (pós-centrífuga)	U (inicial)	75,0	%	
Secador térmico tipo tambor rotativo				
Consumo de Energia Térmica	E term(u)	1,0	kWh/Kg água	Fabricante
Consumo de Energia Elétrica	E eletr(u)	0,085	kWh/Kg água	
Secador térmico tipo esteira				
Consumo de Energia Térmica	E term(u)	0,9	kWh/Kg água	Fabricante
Consumo de Energia Elétrica	E eletr(u)	0,09	kWh/Kg água	
Secador Solar				
Consumo de Energia Elétrica	E eletr(u)	0,028	kWh/Kg água	Fabricante
Área requerida para secagem térmica	A	1855	m²	
Comprimento da estufa	L	85	m	

ETE 1 - UASB – LA				
Volume diário de biogás produzido reator UASB	V bio	2119,6	m³/d	-
Perda de biogás (UASB)	perda (bio)	30	%	Adotado
Volume de biogás disponível reator UASB	Vbio (disp)	1483,7	m³/d	-
Porcentagem de metano no biogás reator UASB	% (bio)	75	%	Cabral (2015)
Poder calorífico do biogás (75% metano)	PCI biogás	7,4	kWh/m³	Lobato (2011)
ETE 2 - DP - LA - DIG				
Volume diário de biogás produzido digestor	V bio	1712,0	m³/d	-
Porcentagem de metano no digestor	% (bio)	65	%	Jordão (2014)
Poder calorífico do biogás (65% metano)	PCI biogás	6,5	kWh/m³	Lobato (2011)

Parâmetro	Notação	Valor	Unidade	Fonte
Eficiências de conversão do biogás				
Eficiência elétrica do motor-gerador	μ_{ele} (chp)	38	%	Fabricante
Eficiência térmica do motor-gerador	μ_{ter} (chp)	42	%	Fabricante
Tempo de funcionamento do moto-gerador	h	8000	horas/ano	Fabricante
Eficiência térmica na combustão do biogás	μ_{ter} (comb)	80	%	Lobato (2011)
Custos Unitários				
Poder calorífico do gás natural	PCI gn	10,36	kWh/m³	Jordão (2014)
Custo Gás natural	C gn (u)	1,38	R\$/m³	CEG
Custo médio de energia elétrica	C el (u)	0,377706	R\$/Kwh	Celesc (2015)
Conversão Euro-Reais	€ - R\$	3,50	R\$	Adotado
Custo dos Equipamentos				
Secador tambor rotativo	Ist (tr)	R\$ 875.000,00	Reais	Fabricante
Secador tipo esteira	Ist (te)	€ 1.327.117,00	Euros	Fabricante
Secador Solar	Ist (ss)	€ 882.711,00	Euros	Fabricante
Unidade motor-gerador	I(chp)	R\$1.344.219,00	Reais	Rosenfeldt et al., (2015)
Sistema de Tratamento de Biogás	Itrat	R\$ 147.933,00		
Gasômetro	Igaso	R\$ 279.349,00		
Sistema de captação de biogás	Icap	R\$ 120.964,00		
Sistema de transporte de biogás	Itrans	R\$ 59.876,00		

Instalações Elétricas	Iel(bio)	R\$ 117.571,00	Reais	Rosenfeldt et al., (2015)
Medição de vazão de biogás	Imed(bio)	R\$ 29.988,00		
Medição de composição de biogás	Icom(bio)	R\$ 86.357,00		
Sistema de queima	Iq(bio)	R\$ 80.568,00		

Fonte: autor.

4.3 Cálculo da energia disponível no biogás

Para realizar o cálculo da energia contida no biogás deve-se conhecer seu volume disponível e conhecer seu poder calorífico, assim utiliza-se a equação 1.

$$E \text{ biogás} = V_{bio} (disp) \times PCI \text{ biogás} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

E biogás: Energia contida no biogás (kWh/dia)

V bio (disp): Volume diário de biogás disponível (m³/dia)

PCI biogás: Poder calorífico inferior do biogás (kWh/m³) – (Varia em função do teor de metano no biogás)

4.3.1 Cálculo da geração de energia elétrica

Para calcular a quantidade de energia elétrica produzida no motor-gerador deve-se utilizar a equação 2.

$$E_{el} = P \times h \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

Eel: Energia elétrica produzida no motor-gerador (kWh/ano)

P: Potência instalada no motor-gerador (kW)

h : Horas úteis de trabalho do motor-gerador (horas/ano)

A potência instalada é definida a partir da equação 3.

$$P = \frac{E_{biogas} \times \mu_{ele}}{24} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

P: Potência instalada (kW)

E biogás: Energia contida no biogás (kWh/dia)

μ_{ele} : Eficiência em conversão elétrica do motor-gerador (%)

4.3.2 Cálculo da energia térmica disponível

O cálculo da energia térmica que estará disponível da secagem depende da energia disponível no biogás e da eficiência de conversão em energia térmica ou do motor-gerador ou da combustão do biogás, assim utiliza-se a equação 4.

$$E_{term} (disp) = E_{biogas} \times \mu_{ter} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

E term (disp): Energia térmica disponível para o secador térmico (kWh/dia)

μ_{ter} : Eficiência em conversão a energia térmica do motor-gerador ou da combustão do biogás (%).

4.4 Cálculo do custo operacional diário

Os custos operacionais associados a cada uma das alternativas serão baseados nos custos diários de cada um dos seguintes itens que compõe o sistema de aproveitamento energético do biogás e o sistema de secagem térmica (equação 5).

$$OPEX_{total} = CTD + CST + CSBG + CEN + CGN - \Delta GE \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

OPEX total: Custo total diário de operação do sistema para cada alternativa (R\$/dia)

CTD: Custo com disposição final de lodo em aterro sanitário (R\$/dia)

CST: Custo de operação e manutenção secador térmico (R\$/dia)

CSBG: Custo do sistema de aproveitamento do biogás e manutenção do motor-gerador (R\$/dia)

CEN: Custo com energia elétrica para o sistema de secagem térmica (R\$/dia)

CGN: Custo com gás natural como energia complementar ao sistema de secagem térmica (R\$/dia)

ΔGE: Ganho financeiro com a produção de energia elétrica no motor-gerador (R\$/dia)

4.4.1 Custo com disposição final de lodo

$$CTD = M \text{ lodo} \times Cdf \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

M lodo: Massa de lodo transportada (T/dia)

Cdf: Custo unitário para destino final em aterro sanitário (R\$/T) – Varia conforme teor de sólidos final.

Para isso, deve-se saber qual o volume de lodo para determinado teor de sólidos, utiliza-se a equação 7.

$$V(\text{lodo}) = \frac{M \text{ ss}}{\gamma \times TS} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

V (lodo): Volume de lodo (m³/dia)

Mss: Massa de sólidos produzida diariamente (KgSS/dia)

γ: Massa específica do lodo (Kg/m³).

TS: Teor de sólidos do lodo (%).

Por fim, calcula-se a massa de lodo final transportada utilizando a equação 8.

$$M \text{ lodo} = V (\text{lodo}) \times \gamma \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

M lodo: Massa de lodo (Kg/dia)

V (lodo): Volume de lodo (m³/dia)

γ : Massa específica do lodo (Kg/m³)

4.4.2 Custo de operação e manutenção secador térmico

Os custos associados à operação e manutenção dos sistemas de secagem térmica foram estimados em 2% ao ano do valor do investimento inicial (equação 9).

$$CST = \frac{2\% \times Ist}{365} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

CST: Custo de manutenção e operação do secador térmico (R\$/dia)

Ist: Investimento inicial no secador térmico (R\$)

4.4.3 Custo de operação e manutenção do sistema de biogás e motor-gerador

Os custos de operação do sistema de aproveitamento do biogás e motor-gerador foram baseados no estudo de caso realizado por Rosenfeldt et al., (2015) para a instalação de um conjunto motor-gerador em uma estação de tratamento em Feira de Santana/BA que está em fase implantação.

Rosenfeldt et al., (2015) basearam os custos específicos de manutenção e de reparação para o motor-gerador de acordo com Döhler et al., (2013), adotando R\$ 0,0210 e R\$ 0,0315 por quilowatt-hora gerada por ano, respectivamente. O custo específico do tratamento de biogás foi de R\$ 0,035, referindo-se à quantidade de biogás tratado por ano. A estimativa dos custos de manutenção das demais unidades do sistema de aproveitamento do biogás foi estimada em 2 % do custo de investimento de cada unidade (Tabela 7).

Tabela 7: Custo de manutenção do sistema para aproveitamento do biogás

Descrição	Un.	Custo unitário (R\$)
Manutenção de geração	kW/ano	0,021
Reparação de geração	kW/ano	0,0315
Manutenção do sistema de tratamento de gás	m ³ /ano	0,035
Manutenção do Gasômetro	ano	5.586,98
Manutenção do Sistema de captação de biogás	ano	2.419,28
Manutenção do Sistema de transporte de biogás	ano	1.197,52
Manutenção das Instalações Elétricas	ano	2.351,42
Manutenção da Medição de vazão de biogás	ano	599,76
Manutenção da Medição de composição de biogás	ano	1.727,14
Manutenção do Sistema de queima	ano	1.611,36
Autoconsumo de energia elétrica do moto-gerador	kWh/a	0,192188
Consumo de Óleo Lubrificante	l/a	7,28
Análises Laboratoriais - Óleo Lubrificante	un	435
Análises Laboratoriais - Biogás	un	1.800,00
Mão de Obra de Operador	h/a	25,43
Custos Gerais	kW	24,5

Fonte: Adaptado pelo autor de Rosenfeldt et al. (2015).

4.4.4 Custo com energia elétrica

Para calcular a quantidade de energia elétrica utilizada pelos sistemas de secagem utiliza-se a equação 10.

$$CEN = Eel \times Cel (u) \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

CEN: Custo com energia elétrica para o sistema de secagem térmica (R\$/dia)

Eel: Energia elétrica demandada pelo secador térmico (kWh/dia)

Cel (u): Custo unitário de energia elétrica (R\$/kWh).

4.4.5 Custo com gás natural

Para calcular a quantidade de gás natural utilizado pelos sistemas de secagem utiliza-se a equação 11.

$$CGN = VGN \times C_{gn} (u) \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

CGN: Custo com gás natural para o sistema de secagem térmica (R\$/dia)

VGN: Volume de gás natural utilizado (m³/dia).

$C_{gn}(u)$: Custo Gás natural unitário (R\$/m³)

Para o cálculo do volume de gás natural necessário utiliza-se a equação 12.

$$VGN = \frac{E_{gás\ natural} (req)}{PCI} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

$E_{gás\ natural} (req)$: Energia de gás natural requerida (kWh/dia)

PCI gn: Poder calorífico inferior do gás natural (kWh/m³)

Para avaliar a necessidade de complemento com energia proveniente de gás natural, deve-se fazer a seguinte consideração:

Se: $E_{\text{térmica (disp)}} > E_{\text{térmica (req)}} \therefore E_{\text{gás natural}} = 0$

$E_{\text{térmica (disp)}} < E_{\text{térmica (req)}} \therefore E_{\text{gás natural}} = E_{\text{térmica (req)}} - E_{\text{térmica (disp)}}$

O cálculo da quantidade de energia térmica requerida pelo secador térmico utiliza a equação 13.

$$Et_{\text{térmica}}(req) = M(\text{água evap}) * Et_{\text{térmica}}(u) \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

$Et_{\text{térmica}}(req)$: Energia térmica requerida pelo secador térmico (kWh/dia)

$M(\text{água evap})$: Massa de água evaporada (Kg água/dia)

$Et_{\text{térmica}}(u)$: Energia térmica consumida pelo secador térmico por Kg de água evaporada (kWh/Kg água)

A quantidade de água evaporada é a diferença entre a massa de lodo afluente e a massa efluente ao secador térmico, conforme equação 14.

$$M(\text{água evap}) = M_{\text{lodo}}(ast) - M_{\text{lodo}}(est) \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

$M_{\text{lodo}}(ast)$: Massa de lodo afluente ao secador térmico (Kg/dia).

$M_{\text{lodo}}(est)$: Massa de lodo efluente ao secador térmico (Kg/dia).

4.4.6 Ganho financeiro com a geração de energia elétrica

Nas alternativas onde será considerada a instalação de um conjunto motor-gerador, haverá a produção de energia elétrica que pode

ser utilizada na própria estação de tratamento o que reduz os custos de energia elétrica dos equipamentos da estação. Entretanto, no seguinte trabalho será avaliado apenas o consumo de energia elétrica no sistema de secagem térmica, assim o excedente de energia elétrica produzida será considerado como um ganho financeiro conforme equação 15, reduzindo dos custos operacionais das alternativas que utilizarem dessa estratégia.

$$\Delta GE = Eel \times Cel(u) \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

ΔGE : Ganho financeiro com energia elétrica produzida no motor-gerador (R\$/dia).

Eel Energia elétrica produzida no motor-gerador (kWh/dia).

Cel (u): Custo unitário de energia elétrica (R\$/kWh).

4.4.7 Cálculo do valor presente do custo operacional

Para avaliar o custo total de operação de cada alternativa em valor presente, utiliza-se a equação 16.

$$OPEX (total VP) = \frac{opex(1)}{(1+i)^1} + \frac{opex(2)}{(1+i)^2} + \dots + \frac{opex(n)}{(1+i)^n} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

OPEX (total VP): Custo total de operação do projeto em valor presente (R\$).

$opex(n)$: Custo total de operação para o ano (n) (R\$).

I: Taxa de juro anual (%).

n: Vida útil do projeto (anos).

4.5 Custos de investimento no sistema de secagem térmica

Os custos de investimento dos equipamentos de secagem térmica foram obtidos a partir de informações passadas por dois fabricantes desses equipamentos. O secador térmico do tipo tambor

rotativo é um equipamento de fabricação nacional com alguns casos de aplicação no Brasil, já os equipamentos de secagem térmico do tipo esteira e secador solar são de fabricação alemã. Os demais investimentos em equipamentos foram baseados no estudo realizado por Rosenfeldt et al. (2015).

Cabe destacar que ao longo do ciclo de vida do projeto é necessária a substituição de equipamentos do sistema de aproveitamento do biogás, assim esses custos com substituição também devem ser levados ao seu valor presente utilizando à equação 17.

$$CAPEX (total VP) = Capex(o) + \frac{Capex(8)}{(1+i)^8} + \frac{Capex(10)}{(1+i)^{10}} + \frac{Capex(15)}{(1+i)^{15}}$$

(Equação 17)

Onde:

CAPEX (total VP): Custo total de investimento do projeto em valor presente (R\$).

$capex(n)$: Custo de substituição de equipamentos para determinado ano (R\$).

I: Taxa de juro anual (%).

4.6 Custo total do sistema avaliado

Para o cálculo total do sistema de secagem utiliza-se a equação 18.

$$Custo total = CAPEX (total VP) + OPEX (total VP) \quad \text{(Equação 18)}$$

4.7 Análise do ciclo de vida do projeto

Para avaliar os custos totais associados a cada alternativa é necessário estabelecer um período de análise das alternativas. Para o trabalho foi escolhida uma avaliação de ciclo de vida (ACV) em 20 anos, pois é o tempo estimado do ciclo de vida dos equipamentos de secagem térmica. Também foi necessário estimar uma taxa de inflação para o horizonte do projeto sendo estabelecida uma taxa de inflação de 8% a.a. A vida útil dos demais equipamentos (Tabela 8) foram baseadas no estudo de Rosenfeldt et al. (2015).

Tabela 8: Ciclo de vida dos equipamentos

Equipamento	Ciclo de Vida
Unidade Motor-Gerador	15
Sistema de Tratamento de Biogás	10
Gasômetro	15
Sistema de captação de biogás	10
Sistema de transporte de biogás	10
Instalações Elétricas	20
Medição de vazão de biogás	8
Medição de composição de biogás	8
Sistema de queima	8

Fonte: Adaptado pelo autor de Rosenfeldt et al. (2015).

Pelo exposto na tabela 8 é possível perceber que ao longo do horizonte do projeto (20 anos) será necessário à substituição de equipamentos que compõe o sistema de aproveitamento do biogás.

Para o trabalho será considerado o método do valor presente líquido (VPL) que é considerado um modo exato e consiste em trazer para o tempo presente, após a definição de uma taxa de juros os valores obtidos a partir do fluxo de caixa dos custos e benefícios ao longo de um período de análise.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas tabelas 9 e 10 serão expostos os resultados dos cálculos para as duas estações de tratamento.

Tabela 9: Resumo dos resultados obtidos ETE 1.

ETE 1 - (UASB-LA)	Simbologia	Uni.	Alt.1	Alt.2	Alt.3	Alt.4	Alt.5	Alt.6
Volume de biogás disponível	V bio (disp)	m³/dia	1483,69	1483,69	1483,69	1483,69	1483,69	1483,69
Energia disponível no biogás	E bio (disp)	kWh/dia	10.979	10.979	10.979	10.979	10.979	10.979
Energia elétrica produzida	E elétrica (disp)	kWh/dia	-	3.810	3.810	-	-	-
Energia térmica produzida	E térmica (disp)	kWh/dia	-	4.611,3	4.611,3	-	-	-
Energia disponível no biogás aplicada totalmente para secagem térmica	E comb (disp)	kWh/dia	-	-	-	8.783	8.783	-
Potência Instalada CHP	P chp	kW	-	173,8	173,8	-	-	-
Energia Térmica (requerida) pelo secador térmico	E térmica (req)	kWh/dia	-	7.586,8	8.429,8	7.586,8	8.429,8	-
Energia elétrica (requerida) pelo secador térmico	E elétrica (req)	kWh/dia	-	758,7	716,5	758,7	716,5	392,2
Energia complementar gás natural	E (gn)	kWh/dia	-	2.975,5	3.818,5	-	-	
Consumo diário de gás natural	V (gn)	m³/dia	-	287,2	368,6	-	-	-
Massa de lodo transportada	M	t/dia	11,67	3,24	3,24	3,24	3,24	3,89

Tabela 10: Resumo dos resultados obtidos ETE 1 (Continuação).

ETE 1 - (UASB-LA)	Símbolo gia	Uni	Alt.1	Alt.2	Alt.3	Alt.4	Alt.5	Alt.6
OPEX								
Custo total de operação diário	OPEX (total)	R\$/ dia	R\$ 1.867,52	R\$ 205,51	R\$ 95,31	R\$ 999,22	R\$ 776,73	R\$ 718,46
Custo total de operação e manutenção ao longo do projeto (VP)	OPEX (total VP)	R\$	R\$ 13.632.896	R\$ 1.500.240	R\$ 695.768	R\$ 7.294.337	R\$ 5.670.158	R\$ 5.244.762
CAPEX								
Investimento secadores térmicos (VP)	CAPEX st	R\$	-	R\$ 4.644.909	R\$ 875.000	R\$ 4.644.909	R\$ 875.000	R\$ 3.089.488
Investimento sistema aproveitamento biogás (VP)	CAPEX sg	R\$	-	R\$ 3.067.659	R\$ 3.067.659	R\$ 1.221.558	R\$ 1.221.558	-
Investimento total sistema de secagem térmica (VP)	CAPEX total	R\$	-	R\$ 7.712.568	R\$ 3.942.659	R\$ 5.866.467	R\$ 2.096.558	R\$ 3.089.488
CAPEX + OPEX								
Custo total	CUSTO TOTAL	R\$	R\$ 13.632.896	R\$ 9.212.809	R\$ 4.638.427	R\$ 13.160.804	R\$ 7.766.716	R\$ 8.334.251
Custo per capita	CUSTO percap	R\$/ hab	R\$ 136,33	R\$ 92,13	R\$ 46,38	R\$ 131,61	R\$ 77,67	R\$ 83,34

Fonte: autor.

Tabela 11: Resumo dos resultados obtidos ETE 2.

ETE 2 - (DP-LA-DIG)	Simbologia	Uni	Alt.1	Alt.2	Alt.3	Alt.4	Alt.5	Alt.6
Volume de biogás disponível	V bio (disp)	m³/dia	1712,0	1712,0	1712,0	1712,0	1712,0	1712,0
Energia disponível no biogás	E bio (disp)	kWh/dia	10.957	10.957	10.957	10.957	10.957	10.957
Energia elétrica produzida	E elétrica (disp)	kWh/dia	-	3.802	3.802	-	-	-
Energia térmica produzida	E térmica (disp)	kWh/dia	-	4.211	4.211	-	-	-
Energia disponível no biogás aplicada totalmente para secagem térmica	E comb (disp)	kWh/dia	-	-	-	8.765	8.765	-
Potência Instalada CHP	P (chp)	kW	-	173,8	173,8	-	-	-
Energia Térmica (requerida) pelo secador térmico	E térmica (req)	kWh/dia	-	9893	10992	9893	10992	-
Energia elétrica (requerida) pelo secador térmico	E elétrica (req)	kWh/dia	-	989,3	934,3	989,3	934,3	392,2
Energia complementar gás natural	E (gn)	kWh/dia	-	1.483	7.137	1.483	2.581,8	-
Consumo diário de gás natural	V (gn)	m³/dia	-	582,75	688,85	143,10	249,21	-
Massa de lodo transportada	M (lodo)	t/dia	15,22	4,23	4,23	4,23	4,23	5,07

Tabela 12: Resumo dos resultados obtidos ETE 2 (Continuação).

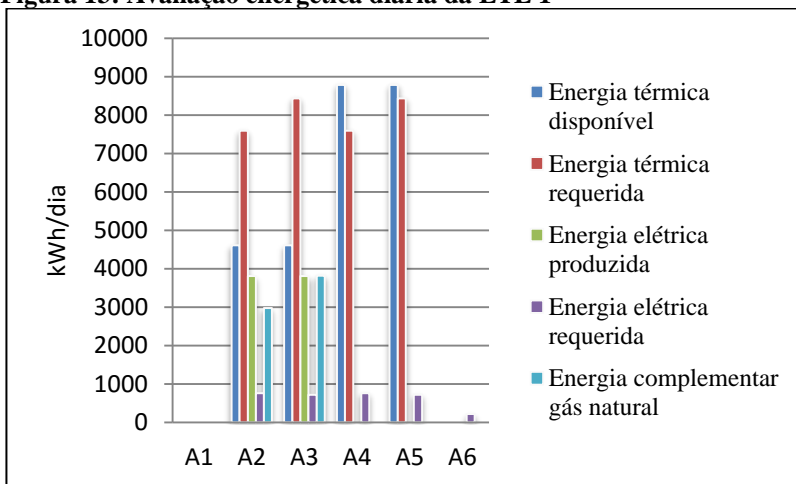
ETE 2 - (DP-LA-DIG)	Simbologia	Uni	Alt.1	Alt.2	Alt.3	Alt.4	Alt.5	Alt.6
OPEX								
Custo total de operação diário	OPEX (total)	R\$/dia	R\$ 2.435,20	R\$ 707,36	R\$ 626,45	R\$ 1.288,20	R\$ 1.207,29	R\$ 885,40
Custo total de operação e manutenção ao longo do projeto (VP)	OPEX (total VP)	R\$	R\$ 17.776.960	R\$ 5.163.745	R\$ 4.573.116	R\$ 9.403.847	R\$ 8.813.219	R\$ 6.463.389
CAPEX								
Investimento secadores térmicos (VP)	CAPEX st	R\$	-	R\$ 4.644.909	R\$ 875.000	R\$ 4.644.909	R\$ 875.000	R\$ 3.089.488
Investimento sistema aproveitamento biogás (VP)	CAPEX sb	R\$	-	R\$ 3.067.659	R\$ 3.067.659	R\$ 1.221.558	R\$ 1.221.558	-
Investimento total sistema de secagem térmica (VP)	CAPEX total	R\$	-	R\$ 7.712.568	R\$ 3.942.659	R\$ 5.866.467	R\$ 2.096.558	R\$ 3.089.488
CAPEX + OPEX								
Custo total	CUSTO TOTAL	R\$	R\$ 17.776.960	R\$ 12.876.313	R\$ 8.515.775	R\$ 15.270.315	R\$ 10.909.777	R\$ 9.552.878
Custo per capita	CUSTO percap	R\$/hab	R\$ 177,77	R\$ 128,76	R\$ 85,16	R\$ 152,70	R\$ 109,10	R\$ 95,53

Fonte: autor.

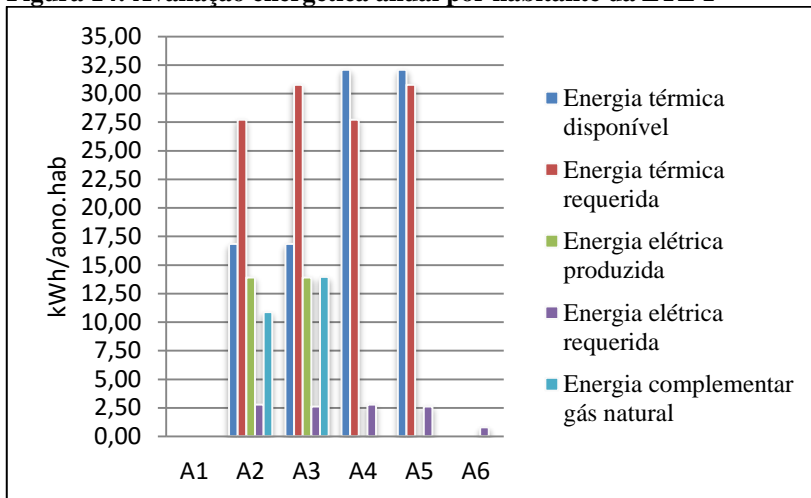
5.1. Avaliação energética ETE 1

As figuras 13, 14, consolidam de forma gráfica os resultados referentes ao consumo energético na ETE 1. Nestes gráficos a primeira coluna indica a quantidade de energia térmica disponível seguida pela quantidade de energia térmica requerida. Quando utilizado o conjunto motor-gerador, na terceira e quarta coluna das figuras é indicada a quantidade de energia elétrica produzida e a quantidade de energia elétrica requerida para o sistema de secagem térmica. A quinta e última coluna indica a quantidade de energia complementar com gás natural para realizar o processo da secagem térmica.

Figura 13: Avaliação energética diária da ETE 1



Fonte: autor.

Figura 14: Avaliação energética anual por habitante da ETE 1

Fonte: autor.

Pode ser observado nas figuras 13 e 14 que as alternativas A1 e A6 não fazem uso da energia proveniente do biogás, sendo realizada apenas a queima do mesmo. As alternativas A2 e A3 fazem o uso total da energia contida no biogás para aplicação no motor-gerador, com isso, tem-se a produção de energia elétrica e o aproveitamento da energia térmica residual, o que caracteriza como um processo de cogeração.

Nesse modelo de aproveitamento, a principal vantagem é a geração de energia elétrica que proporciona uma economia dos custos totais de operação da estação sendo avaliado no trabalho como um ganho financeiro. A desvantagem dessa alternativa é a necessidade de complementação com gás natural, pois o rendimento térmico do processo de cogeração não é suficiente para suprir a quantidade térmica de energia necessária para o processo de secagem.

As alternativas A4 e A5 fazem o aproveitamento total do potencial energético do biogás para secagem térmica, através de sua queima em câmaras de combustão. Essa modalidade possui a vantagem de suprir de forma integral a quantidade de energia térmica necessária para o processo de secagem e tem como principal desvantagem a não geração de energia elétrica.

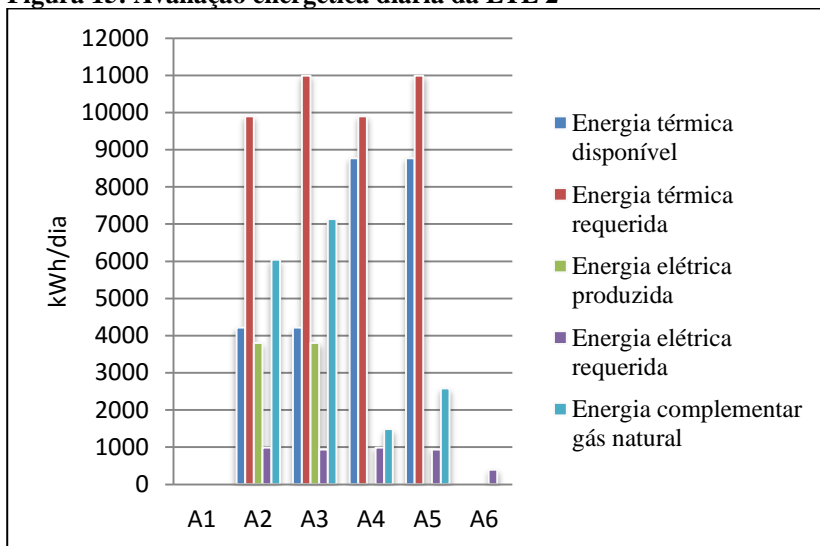
Por último, na alternativa A6 foi avaliado apenas o consumo de energia elétrica nos equipamentos de secagem solar, entretanto, é

constatado que entre as alternativas avaliadas é a que apresentou o menor consumo de energia eléctrica em relação aos processos usuais de secagem térmica.

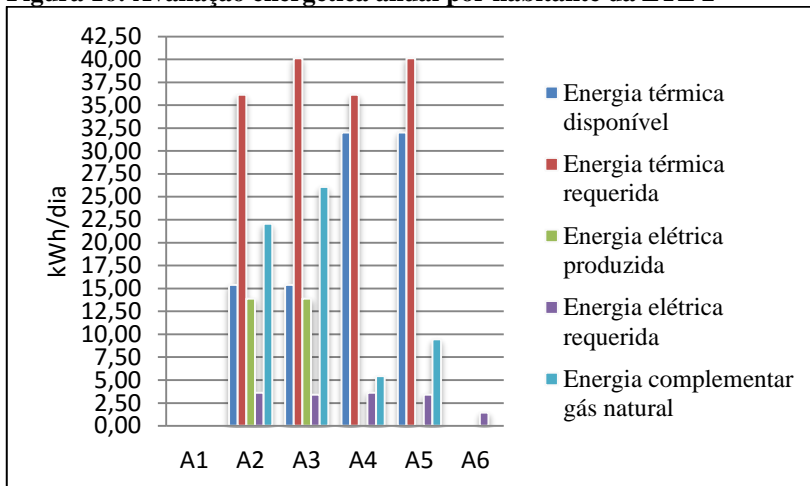
5.2. Avaliação energética ETE 2

Pode ser observado nas figuras 15 e 16 que as alternativas A1 e A6 não fazem uso da energia proveniente do biogás sendo realizada apenas a queima do mesmo. As alternativas A2 e A3 fazem o uso total da energia contida no biogás para aplicação no motor-gerador, dessa forma, tem-se a produção de energia eléctrica e o aproveitamento da energia térmica residual.

Figura 15: Avaliação energética diária da ETE 2



Fonte: autor.

Figura 16: Avaliação energética anual por habitante da ETE 2

Fonte: autor.

As alternativas A4 e A5 fazem o aproveitamento total do potencial energético do biogás para secagem térmica, através de sua queima em câmaras de combustão. Essa modalidade para o caso da ETE 2 não supriu de forma integral a quantidade de energia térmica, entretanto foram as alternativas que necessitaram de menor quantidade de complementação com energia proveniente do gás natural.

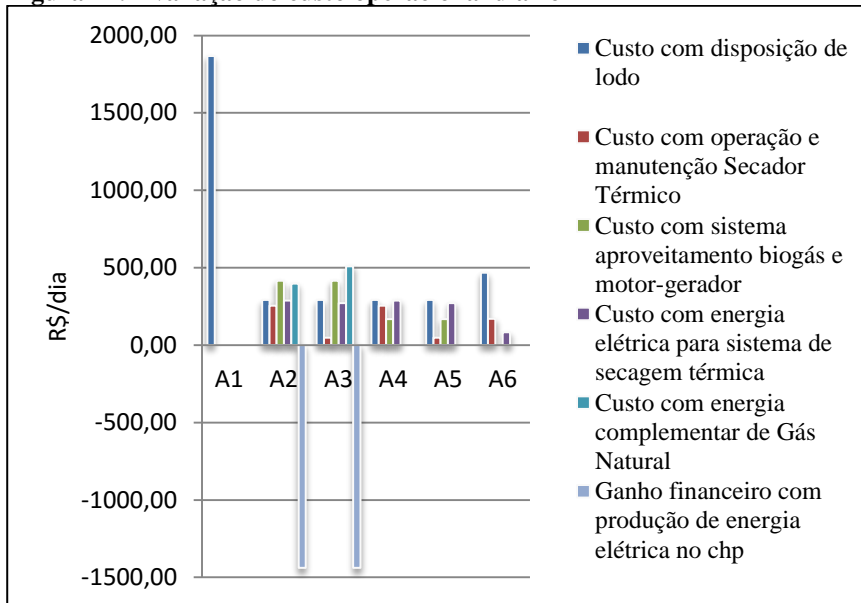
Por último, na alternativa A6 foi avaliado apenas o consumo de energia elétrica nos equipamentos de secagem solar. Entre as alternativas avaliadas é a que apresentou o menor consumo de energia elétrica em relação aos processos usuais de secagem térmica.

Comparando a avaliação energética da ETE 1 e ETE 2 é possível constatar que a segunda apresenta maiores requisitos energéticos necessários isso se deve ao fato da ETE 2 possuir uma maior quantidade de lodo produzida diariamente e sua modalidade de tratamento de efluentes não incluir o tratamento anaeróbio, que ajudaria a reduzir a quantidade de lodo gerada na estação.

5.3. Avaliação do custo operacional diário ETE 1

A figura 17 trás de forma gráfica todos os custos operacionais envolvidos na secagem térmica em cada uma das alternativas da ETE 1.

Figura 17: Avaliação do custo operacional diário ETE 1



Fonte: autor.

A alternativa A1 considera apenas o custo com a disposição final de lodo em aterro sanitário. Essa estratégia é a mais usual nas estações de tratamento, onde o lodo é levado para disposição final com um alto teor de umidade o que resulta em elevados custos com disposição final em aterros sanitários.

As alternativas A2 e A3 são aquelas que possuem a maior quantidade de custos operacionais associados, pois necessitaram da compra do gás natural como complemento para o processo de secagem térmica. Entretanto, são as alternativas que apresentaram o menor custo operacional diário, uma vez que é reduzido de seus custos de operação o ganho financeiro com a geração de energia elétrica.

Os casos A4 e A5 apresentaram maior custo operacional quando comparada com as alternativas A2 e A3. O maior custo é

consequência de não possuírem o ganho financeiro com a produção de energia elétrica. Entretanto, os custos das alternativas A4 e A5 ainda são menores que a alternativa A1, pois a secagem térmica proporcionou uma redução significativa no custo com disposição final de lodo.

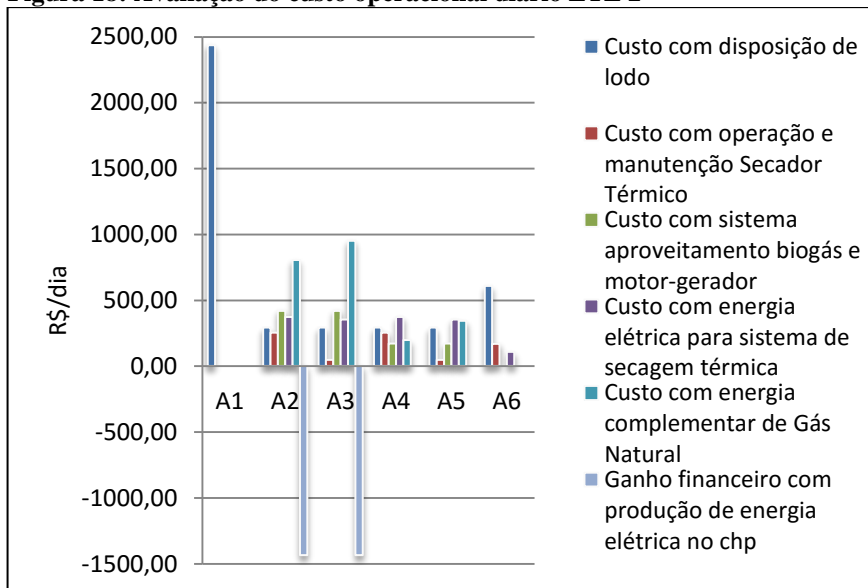
A alternativa A6 apresentou um custo operacional total próximo da alternativa A5, entretanto possui um maior custo de disposição, visto que o teor de sólidos final nessa alternativa é de 75%. A principal desvantagem da alternativa A6 é a necessidade de grandes requisitos de área para a secagem, o que inviabiliza sua utilização em estações onde o espaço disponível para o tratamento é reduzido.

De um modo geral, todas alternativas analisadas para ETE 1 tiveram redução no custo total de operação quando comparado com o processo usual de tratamento de lodo utilizado na alternativa A1.

5.4. Avaliação do custo operacional diário ETE 2

A figura 18 trás de forma gráfica todos os custos operacionais envolvidos na secagem térmica em cada uma das alternativas da ETE 2.

Figura 18: Avaliação do custo operacional diário ETE 2



Fonte: autor.

A alternativa A1 novamente considerou apenas o custo com a disposição final de lodo em aterro sanitário, sendo essa estratégia a mais usual nas estações de tratamento.

As alternativas A2 e A3 são aquelas que possuíram os maiores custos com compra de gás natural como complemento para o processo de secagem térmica. Entretanto, ainda assim, foram as alternativas que apresentaram os menores custos operacionais diários, considerando que é reduzido de seus custos de operação o ganho financeiro com a geração de energia elétrica.

Os casos A4 e A5 apresentaram maior custo operacional que as alternativas A2 e A3 pelo fato de não possuírem o ganho financeiro com a produção de energia elétrica, porém os custos associados com a compra de gás natural foram menores devido ao fato dessas alternativas apresentarem uma maior conversão da energia do biogás em energia térmica.

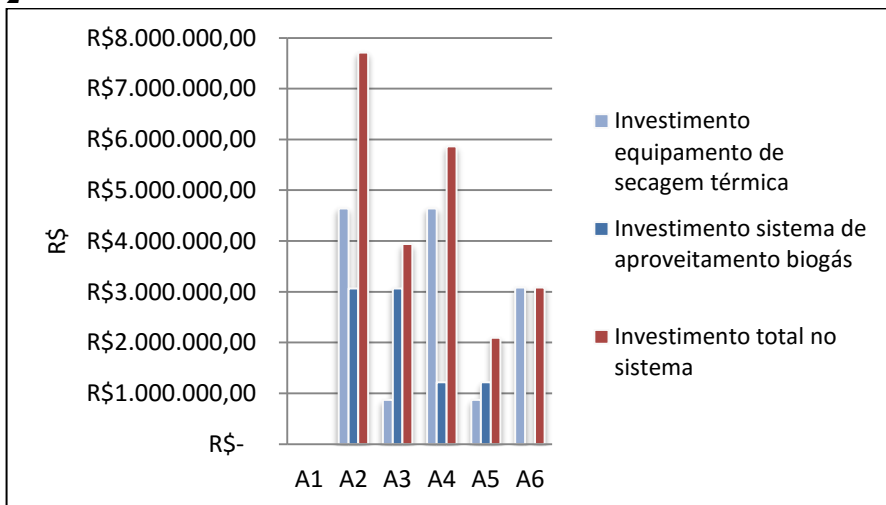
A alternativa A6 apresentou um custo operacional total intermediário, entretanto, possui um maior custo de disposição, pois o teor de sólidos final nessa alternativa é de 75%.

De um modo geral todas alternativas analisadas da ETE 2 tiveram redução no custo total de operação quando comparado com o processo usual de tratamento de lodo utilizada na alternativa A1.

5.5. Avaliação das diferentes alternativas com base no valor presente

5.5.1. Avaliação do custo total de investimento para ETE 1 e ETE 2

Na figura 19, verifica-se que não há investimento em equipamentos na alternativa A1, pois nessa alternativa não é realizado o processo de secagem térmica. As alternativas A2, A3, A4 e A5 possuem custos de instalação dos equipamentos de secagem térmica e custos com equipamentos para aproveitamento do biogás para a secagem. Já a alternativa A6 possui apenas os custos com equipamentos de secagem térmica.

Figura 19: Avaliação do custo total de investimento para ETE 1 e ETE**2**

Fonte: autor.

As alternativas A2 e A4 são as que possuíram maior custo de investimento em secagem térmica, pois utilizam o equipamento de secagem do tipo túnel que apresentou o maior valor de investimento por se tratar de um equipamento de fabricação estrangeira.

Em relação ao custo de investimento com sistema de aproveitamento de biogás, as alternativas A2 e A3 apresentaram os maiores valores, visto que inclui nessa parcela o custo de investimento e substituição do moto-gerador ao longo do projeto.

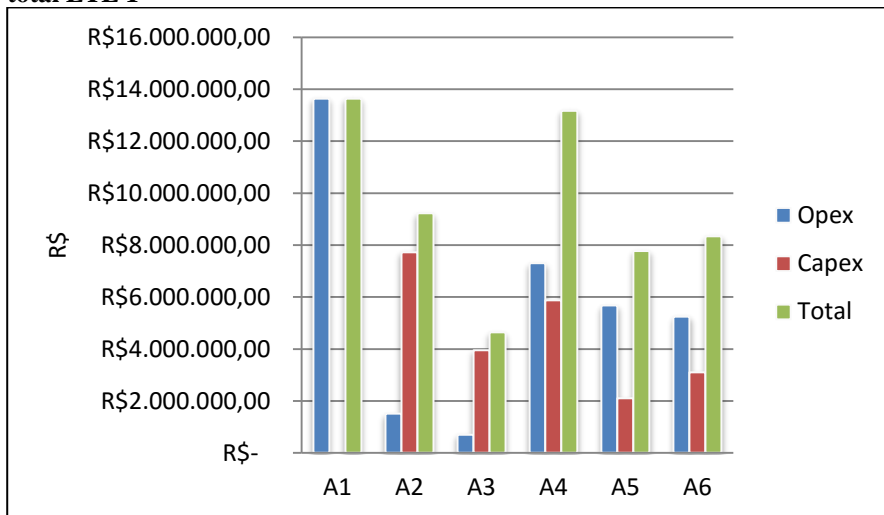
Com base no custo total de investimento, com exceção da alternativa A1, que não possui investimentos em equipamentos, a alternativa que apresentou o menor custo foi à alternativa A5 e a que apresentou o maior foi a alternativa A2.

5.5.2. Análise comparativa custos operacionais, de investimento e total ETE 1

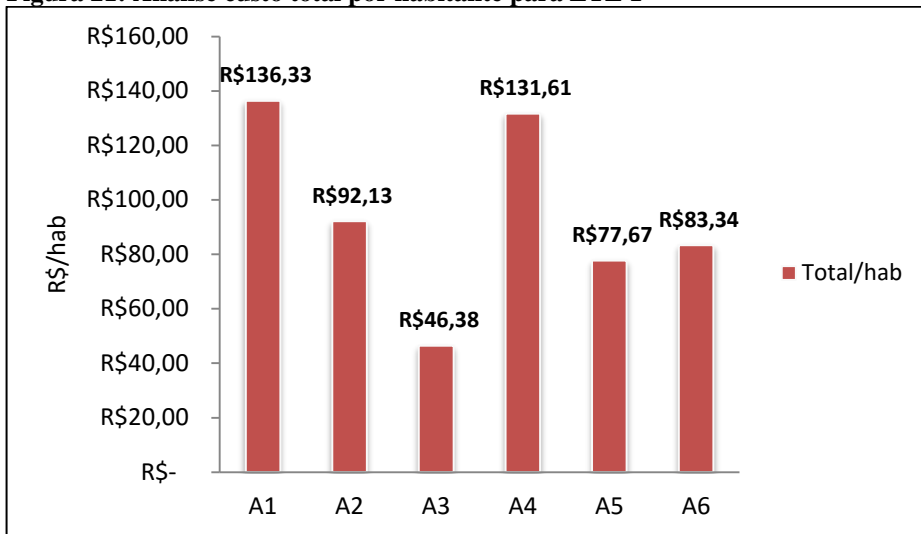
Pela análise das figuras 20 e 21 é possível observar que a alternativa A1, onde não se utiliza secagem térmica de lodo, é aquela onde se tem o maior custo total do projeto em valor presente. Todas as demais alternativas mostraram-se ser mais econômicas em relação à

primeira. Esses resultados indicam que mesmo variando os equipamentos de secagem, bem como a forma de aproveitamento energético do biogás, todas as alternativas apresentaram-se sendo mais vantajosas em termos econômicos.

Figura 20: Análise comparativa custos operacionais, de investimento e total ETE 1



Fonte: autor.

Figura 21: Análise custo total por habitante para ETE 1

Fonte: autor.

As alternativas que apresentaram menor custo total do projeto foram às alternativas A3 e A5. Essas alternativas utilizam o secador térmico tambor rotativo de fabricação nacional que possui menor custo de investimento em relação aos demais (importados) o que refletiu diretamente no custo total do projeto.

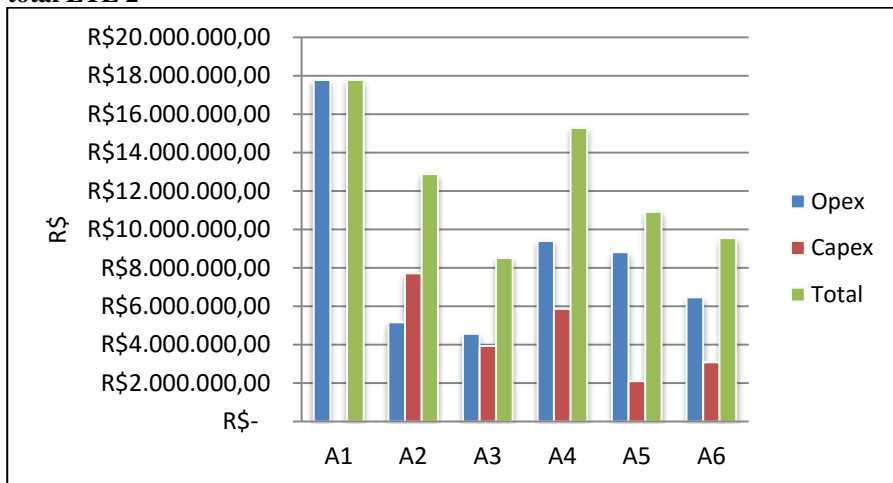
A alternativa A6, que é a utilização de um sistema de secagem solar, é o caso que apresentou um custo total intermediário entre as alternativas. Entretanto, sua aplicação depende da disponibilidade de área para utilização das plantas de secagem solar. Em termos gerais, a aplicação dessa alternativa estaria restrita a estações de tratamento de médio porte e com grande disponibilidade de áreas para sua instalação.

5.5.3. Análise comparativa custos operacionais, de investimento e total ETE 2

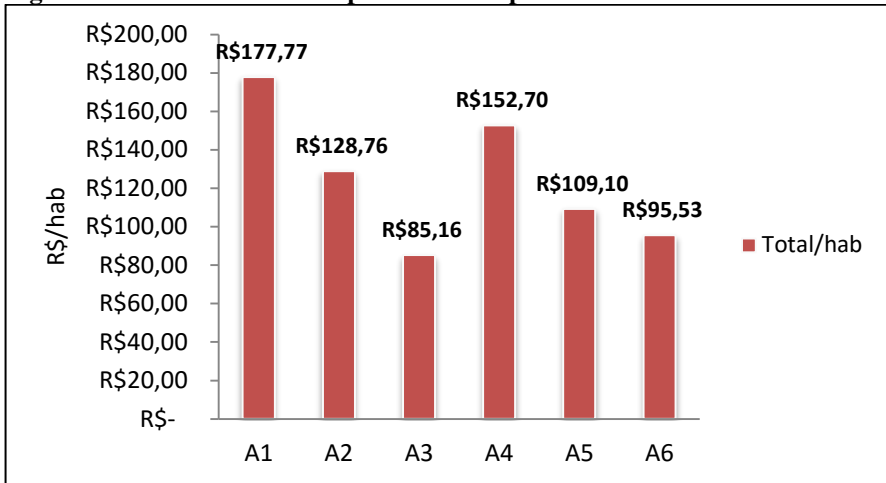
Nas figuras 22 e 23 a alternativa que apresentou menor custo total do projeto foi novamente a alternativa A3 seguida da alternativa A6, para o caso da ETE 2, o sistema de secagem solar apresentou menor custo total em relação as alternativas A2 , A4 e A5. Cabe ressaltar que o requisito de área necessária para secagem térmica não foi avaliado como um custo, ou seja, não é possível afirmar que o sistema solar seja mais

vantajoso que os casos A2, A4 e A5. Novamente os resultados indicam que mesmo variando os equipamentos de secagem bem como a forma de aproveitamento energético do biogás todas as alternativas de apresentaram mais vantajosas economicamente em relação à alternativa A1.

Figura 22: Análise comparativa custos operacionais, de investimento e total ETE 2



Fonte: autor.

Figura 23: Análise custo total por habitante para ETE 2

Fonte: autor.

No caso da ETE 2 a redução dos custos ao longo do projeto foram superiores aos casos da ETE 1 isso se deve ao fato da ETE 2 possuir maior quantidade de lodo produzida diariamente, o que aumenta os custos com disposição final. Nesse caso ao aplicar a secagem térmica, como forma de tratamento, reduziu-se de forma ainda mais significativa o custo total do projeto.

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho buscou apresentar a secagem térmica como uma alternativa de tratamento de lodo.

Os resultados constataram a importância de se avaliar os custos envolvidos no sistema ao longo do seu período de utilização, de modo que se possa avaliar de maneira detalhada onde estão presentes os custos mais significativos de um sistema de secagem térmica e verificar se eles são mais vantajosos que a prática mais usual nas estações de tratamento.

A partir da análise também foi possível verificar que mesmo necessitando de investimentos em equipamentos houve uma economia na utilização desse sistema devido à redução do custo associado à disposição final de lodo. Os resultados mostram de um modo geral que as alternativas que previam um conjunto motorizador apresentaram maiores vantagens por possuírem um ganho econômico pela produção de energia elétrica.

De um modo geral, na avaliação dos cenários propostos, todos foram mais vantajosos que a alternativa A1, considerada nesse trabalho como a prática usual nas estações de tratamento. Entretanto, outros aspectos devem ser considerados em um estudo mais aprofundando. Outro ponto a ser aprofundado seria a inclusão do custo da mão de obra para operação e manutenção de equipamentos de secagem térmica que necessitariam de profissionais mais qualificados para lidar com uma tecnologia ainda não muito usual nas estações. Também poderiam ser detalhados os custos de manutenção dos equipamentos envolvidos na secagem térmica para contribuir de forma mais fidedigna com a realidade do projeto.

Um estudo referente aos riscos intrínsecos de cada tecnologia envolvida também poderia ser incluído no trabalho, de forma a complementar cada alternativa abordada no estudo. Outra questão fundamental que poderia ser complementada é a utilização do lodo após a secagem para algum fim que não seja a disposição final como, por exemplo, na agricultura ou utilizar o próprio potencial energético do lodo como combustível para secagem térmica e assim reduzir os custos com disposição final.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, João Wagner Silva. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. 2000. 165f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANDREOLI, Cleverson Vitório (coordenador). **Alternativas de Uso de Resíduos de Saneamento**. ABES, Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, 2006. 417 p.

ANDREOLI, Cleverson Vitório.; VON SPERLING, Marcos.; FERNANDES, Fernando. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 1ª ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 481 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

ANDREOLI, Cleverson Vitório (Coordenador). **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Rio de Janeiro: ABES, Projeto PROSAB, 1999. 97 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419: **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro 1992. 7 p.

BIELSCHOWSKY, Mayara de Castilho. **Modelo de gerenciamento de lodo de Estação de Tratamento de Esgotos: aplicação do caso da Bacia da Baía de Guanabara**. 2014 165 f. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

BRASIL - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. **Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e da outras providências**. Brasília, ago. 2006.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2013**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2014. 181 p.

BUX, M.; BBAUMANN, R.; PHILIPP, W; CONRAD, T.; MUHLBAUER, W. **Class-A by solar drying recent experiences in Europe**. Proceedings of the WEFTEC (Water Environment Federation) Congress , Atlanta, 2001.

CABRAL, B. G. C.; PLATZER, C. J.; ROSENFELDT, S.; HOFFMANN, H.; CHERNICHARO C.A.L. **Caracterização do biogás gerado no tratamento de efluentes domésticos em reatores UASB no Brasil**. 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015.

CELESC. Resolução nº 1927, de 04 de agosto de 2015. **Homologação Tarifas de energia elétrica**. Disponível em: <<http://novoportal.celesc.com.br/portal/index.php/duvidas-mais-frequentes/1140-tarifa>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

CENBIO. "Nota Técnica VII - Geração de Energia a Partir do Biogás Gerado por Resíduos Urbanos e Rurais", São Paulo, 2001.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Reatores Anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. 379 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).
COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS (COPASA), Minas Gerais. **Secador térmico de lodos da ETE de Montes Claros**. 2011. Disponível em: <<http://www.copasa.com.br/wps/portal/internet/imprensa/noticias/releases/2011/junho/noticias-20110613-ie2042/>>/. Acesso em: 20 ago. 2015.

COSTA, David Freire. **Geração de energia a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado) -

Curso de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DAVID, Airton Checoni. **Secagem Térmica de Lodo de Esgoto, Determinação da umidade de equilíbrio.** 2002. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2002. 1312 p.

DAVID, Airton Checoni; TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Secagem térmica de biossólidos na região metropolitana de São Paulo.** In: 21º. Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental, João Pessoa. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.

FRANÇA JUNIOR, Antônio Tavares de. **Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto.** 2008. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2008.

HUBER. www.huber-technology.com.br. **Secagem Solar e Regenerativa HUBER SRT**, 2015. Disponível em: <<http://www.hubertechnology.com.br/br/produtos/tratamento-de-lodo/secagem/secagem-solar-e-regenerativa-huber-srt.html>>. Acesso em: Agosto 2015.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. **Tratamento de Esgotos Domésticos.** 7. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014. 1087 p.

LIMA, Márcia Regina Pereira. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto.** 2010. 286 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LINDEMEYER, Ricardo Matsukura. **Análise da viabilidade econômico-financeira do uso do biogás como fonte de energia elétrica**. Trabalho de Conclusão de Estágio apresentada à disciplina de Estágio Supervisionado – CAD 5236, como requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em Administração da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

LOBATO, Livia Cristina de Silva. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2011. 184 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Sanitária, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MACHADO, Luiz Leal Netto. **Aspectos técnicos relacionados à geração de energia elétrica a partir do lodo de esgoto**. 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Programa de Engenharia Ambiental Escola Politécnica, Universidade Federal Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4th edition. ed. McGraw Hill, New York: METCALF & EDDY Inc, 2003.

MICELI, Rafael Nava.; VILANI JUNIOR, Waldo.; DODI, Paulo Roberto Paganelli. **Secagem solar mecanicamente assistida de lodo anaeróbico desaguado**: Case ETE Rio Preto. XVIII Exposição de Experiências Municipais em Saneamento. Uberlândia, 2014.

MUJUMDAR, A.S.; YUE, P.L.; CHEN, G. Dewatering and drying of wastewater treatment sludge. Handbook of Industrial Drying. 3ª ed., CRC Press. 1312 p., 2006.

PARK, Kil Jin. **Conceitos de Processo e Equipamentos de secagem**. Campinas: 2007. 127 p. Disponível em < <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html> > acesso em 08 de junho de 2015.

PECORA, Vanessa. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto residencial da USP - Estudo de caso.** 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PEREIRA, Arlindo Jorge Caetano. **Análise do custo do ciclo de vida da ETA de Queimadela.** 2009. 121 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.

ROSA, André Pereira. **Aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto.** 2013. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

ROSENFELDT, S.; CABRAL, C. B. G.; PLATZER, C. J.; HOFFMANN, H.; ARAUJO, R.A. **Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás por meio de motor-gerador em uma ETE.** 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015.

SALOMON, K.R.; LORA, E.E.S. **Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil.** *Biomass and Bioenergy*, Oxford, v.33, p. 1101-1107, 2009.

SPINOSA L.; AYOL A.; BAUDEZ J. C.; CANZIANI R.; JENICEK P.; LEONARD A.; **Sustainable and innovative solutions for sewage sludge management.** *Water* 2011. v.3, p.702-717, 2011.

USEPA-UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2011. Opportunities for Combined Heat and Power at Wastewater Treatment Facilities: Market Analysis and Lessons from the Field. Washington, DC: EPA, 2011 57 p.

VALENTE, Victor Bustani. **Análise de Viabilidade Econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em estações de tratamento de esgoto no Brasil.** 2015. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

VILLANI JUNIOR, W.; MARTINS, G.R.; TAKAHASHI, R.; AGOSTINHO, J.C; MARQUES M.H.D.; BORGHI G.; MICELI, R. **Estudo técnico de viabilidade:** Cogeração de energia a partir do biogás e do lodo proveniente de reatores anaeróbios da ETE Rio Preto. São José do Rio Preto: Serviço Municipal autônomo de água e esgoto (SEMAE). 2011. 42 p

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de Esgotos.** 4^a ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. 452 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.1).

VON SPERLING, Marcos. **Lodos Ativados.** 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012. 427 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.4).

ANEXO – DIMENSIONAMENTO DAS ESTAÇÕES

BASE DE CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO DAS ESTAÇÕES

Tabela 13: Características do esgoto e vazão de projeto

Parâmetro	Valor	Observação
População Atendida (hab)	100.000	-
Consumo per capta (l/hab.d)	160	-
Coeficiente de vazão máxima diária (k_1)	1,2	-
Coeficiente de vazão máxima horária (k_2)	1,5	-
DBO (Kg/d)	5.400	Pop x (54 g/hab.dia ⁱ)/1000
DQO	11.000	Pop x (110 g/hab.dia ⁱⁱ)/1000
NTK	1.100	Pop x (11 g/hab.dia ^{iv})/1000
P	200	($Q_{MED} \times 20 \text{ mg/l}$)/1000
ST	6.000	Pop x (60 g/hab.dia ⁱ)/1000
Qmédia (m³/d)	16.000	(Pop x C)/1000
Qinfiltração (m³/d)	4.800	Adotado
Qmáxima (m³/d)	28.800	Qesgoto x (k_1) x (k_2)
Qtotal (m³/d)	33.600	Qmáxima + Qinfiltração
i	Conforme NBR 12.209 (ABNT, 1992)	
ii	Conforme VON SPERLING (2012)	
iii	Conforme NBR 9.649 (ABNT, 1986)	
iv	Adotado	

Tabela 14 – Parâmetros de projeto – Lodo ativado

Parâmetro	Unidade	Valor	Fonte
Taxa de transferência de oxigênio específica p/ demanda carbonácea tto_c	kg_{O_2}/kg_{DBO_5}	0,80	(1)
Taxa de transferência de oxigênio específica p/ demanda nitrogenada tto_n	kg_{O_2}/kg_{NTK}	4,30	(1)
Coeficiente estequiométrico para desnitrificação tto_d	kg_{O_2}/kg_{NTK}	2,86	(1)
(1) Von Sperling (2012)			

DIMENSIONAMENTO ETE 1

O volume dos reatores UASB podem ser calculados por meio da equação 19, considerando o tempo de detenção hidráulica (TDH) de 10 horas referente à vazão média.

$$V_{UASB} = TDH \cdot Q_{méd} = 10 \text{ h} \cdot 666,67 \text{ m}^3/\text{h} = 6.667 \text{ m}^3$$

(Equação 19)

onde:

- V_{UASB} - Volume útil dos reatores UASB em m^3 ;
 TDH - Tempo de detenção hidráulica em h;
 $Q_{méd}$ - Vazão média em m^3/h .

A eficiência relativa à remoção de carga orgânica pode ser calculado por:

$$\eta_{UASB, DBO} = 1 - 0,70 \cdot TDH^{-0,50} = 1 - 0,70 \cdot 10 \text{ h}^{-0,50} = 77,86 \%$$

(Equação 20)

Onde:

- $UASB, DBO$ - Eficiência do reator UASB referente remoção da DBO_5 em %;
 TDH - Tempo de detenção hidráulica em h.

Conforme Chernicharo (2007), adota-se uma eficiência de 65 %, resultando assim em um concentração de DBO₅ na saída do reator UASB e consequentemente no afluente ao reator de lodo ativado de 275,00 mg/l, que representa uma carga de 1.890 kg_{DBO5}/d.

A produção de lodo anaeróbio excedente pode ser calculada pela equação 21.

$$P_{\text{lodo, anaeróbio}} = Y_{\text{anaerob}} \cdot CA_{\text{DBO5, afl}}$$

(Equação 21)

$$P_{\text{lodo, anaeróbio}} = 0,36 \text{ kg}_{\text{SS}}/\text{kg}_{\text{DBO5}} \cdot 1.890 \text{ kg}_{\text{DBO5}}/\text{d}$$

$$P_{\text{lodo, anaeróbio}} = 1.944 \text{ kg}_{\text{SS}}/\text{d}$$

Onde:

$P_{\text{lodo, anaeróbio}}$ - Produção de lodo anaeróbio excedente em kg_{SS}/d;
 Y_{anaerob} - Produção de lodo anaeróbio excedente específica em kg_{SS}/kg_{DBO5}.

A parcela de DQO convertida em gás metano (DQO_{CH4}) é determinada por:

$$\text{DQO}_{\text{CH4}} = Q_{\text{méd}} \cdot [(S_{\text{DQO, UASB, afluyente}} - S_{\text{DQO, UASB, effluente}}) - Y_{\text{obs}} \cdot S_{\text{DQO, UASB, afluyente}}]$$

$$\text{DQO}_{\text{CH4}} = 4.290 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{d}$$

Sendo:

DQO_{CH4} - parcela de DQO convertida em metano em kg_{DQO}/d;
 $S_{\text{DQO, UASB, afluyente}}$ - DQO afluente em kg/m³;
 $S_{\text{DQO, UASB, effluente}}$ - DQO efluente em kg/m³;
 $Q_{\text{méd}}$ - Contribuição média de esgoto em m³/d;
 Y_{obs} - Coef. de produção de sólidos em termos de DQO (adotado 0,21)

A produção volumétrica de metano é calculada por:

$$Q_{\text{CH4}} = \frac{\text{DQO}_{\text{CH4}}}{K_{(T)}} \quad \text{Equação 22}$$

Sendo o fator de correção para a temperatura operacional do reator determinado por:

$$K_{(T)} = \frac{p \cdot K}{R \cdot (273 + T)} = 2,70 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3 \quad \text{Equação 23}$$

Sendo:

- Fator de correção para a temperatura operacional do reator $\text{kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3$
- p - Pressão atmosférica em atm
- COD correspondente a um mol de $\text{CH}_4 = 64$
- K $\text{g}_{\text{DQO}}/\text{mol}$
- R - Constante universal dos gases
- Temperatura operacional do reator – adotado 16
- T $^{\circ}\text{C}$

$$Q_{\text{CH}_4} = \frac{4.290 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{d}^3}{2,70 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3} = 1.589,67 \text{ m}^3/\text{d} \quad \text{Equação 24}$$

Será considerado conforme Cabral et al.,(2015) que 75% do volume do biogás é metano, tem-se que a vazão de biogás é igual a 2.119,6 m^3/d . Para determinação da quantidade de biogás tecnicamente disponível para o aproveitamento energético deve ser descontada ainda a parcela referente às perdas de biogás que foi adotada em 30 %.

Tabela 15 – Parâmetros de projeto - Tanque de aeração após UASB

Parâmetro	Unidade	Valor	Fonte
Carga DBO	Kg/d	1.890	-
Carga Sólidos Suspensos	Kg/d	939	-
Carga NTK	Kg/d	990	-
Coeficiente de produção celular Y	$\text{g}_{\text{SSV}}/\text{g}_{\text{DBO5removida}}$	0,60	(1)
Idade de Lodo θ_c	d	10	(1)
Concentração de sólidos suspensos voláteis X_v	mg/l	1.500	(1)
Coeficiente de respiração endógena K_d	d^{-1}	0,08	(1)
Fracção biodegradável f_b	$\text{mg}_{\text{SSVb}}/\text{mg}_{\text{SSV}}$	0,70	(1)
Produção de lodo secundário $P_{x,ex}$	$\text{kg}_{\text{SS}}/\text{kg}_{\text{DBO5removida}}$	0,70	(1)
(1) Von Sperling (2012)			

A carga da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) a ser removida é dada pela diferença da concentração na entrada e saída do tanque de aeração e a vazão média de esgoto, calculado pela Equação .

$$CA_{\text{DBO5remov}} = Q \cdot (S_0 - S) \quad \text{Equação 25}$$

onde:

$CA_{\text{DBO5remov}}$ - Carga de DBO_5 removida em kg/d ;

Q - Vazão média;

S_0 - Concentração de DBO no afluente ao TA;

S - Concentração de DBO no efluente do TA;

A quantidade de lodo excedente pode ser calculada pela Equação .

$$P_{x,\text{ex}} = CA_{\text{DBO5remov}} \cdot p_{x,\text{ex}} \quad \text{Equação 26}$$

$$P_{x,\text{ex}} = 1.323 \text{ kg}_{\text{SS}}/\text{d}$$

Onde:

$P_{x,\text{ex}}$ - Produção de lodo excedente em $\text{kg}_{\text{SS}}/\text{d}$;

$CA_{\text{DBO5remov}}$ - Carga de DBO_5 removida em kg/d ;

$p_{x,\text{ex}}$ - Produção específica de lodo excedente em $\text{kg}_{\text{SS}}/\text{kg}_{\text{DBOremov}}$.

O lodo aeróbio excedente é bombeado para o reator UASB, onde é adotada uma redução de 35 % dos sólidos voláteis desta fração. Sabendo-se que a carga de sólidos fixos permanece inalterada, tem-se a seguinte carga de lodo aeróbio, retirado do reator UASB:

Sólidos Voláteis $P_{\text{xv}} = 997 \text{ kg}_{\text{SSV}}/\text{d} \cdot (1 - 0,35) = 648 \text{ kg}_{\text{SSV}}/\text{d}$

Sólidos Fixos $P_{\text{xf}} = 326 \text{ kg}_{\text{SSF}}/\text{d}$

Sólidos Totais $P_{\text{x,LA}} = 648 \text{ kg}_{\text{SSV}}/\text{d} + 326 \text{ kg}_{\text{SSF}}/\text{d} = 974 \text{ kg}_{\text{SS}}/\text{d}$

A quantidade total de lodo excedente é um lodo misto formado por esta parcela, acrescentado da parcela referente ao lodo excedente anaeróbio.

$$P_{\text{x,total}} = P_{\text{x,LA}} + P_{\text{x,UASB}} = 974 \text{ kg}_{\text{SS}}/\text{d} + 1.944 \text{ kg}_{\text{SS}}/\text{d} = 2.918 \text{ kg}_{\text{SS}}/\text{d}$$

(Equação 29)

Adotando um desaguamento a um teor de 25 %, determina-se um volume de lodo igual a 11,67 m³/d

DIMENSIONAMENTO ETE 2

A primeira unidade do arranjo de lodo ativado convencional com digestor anaeróbio de lodo é o decantador primário. No caso do decantador primário determina-se a área mínima somente em função da taxa de aplicação hidráulica máxima de 90 m³/(m².d) .

A seguir são apresentados os parâmetros para o projeto do decantados primário. Chegou-se em dois decantadores primários com diâmetro de 11,00 metros.

Tabela 16 – Parâmetros do decantador primário

Parâmetro	Unidade	Valor
Taxa de aplicação hidráulica TAH para Q _{med}	m ³ /m ² .d	90
Produção específica de lodo primário	kg _{SS} /kg _{DQO} aplicada	0,30
Eficiência de remoção de DBO ₅	%	30
Eficiência de remoção de sólidos suspensos	%	55
Eficiência de remoção de NTK	%	10

Conforme as eficiências de remoção referente à carga orgânica, sólidos e nutrientes podem ser calculadas as cargas no efluente do decantador primário, cargas estas que são relevantes para o dimensionamento do lodo ativado convencional.

$$CA_{x,\text{efluente}} = CA_{x,\text{afluente}} \cdot (1 - \eta_x) \quad \text{Equação 30}$$

onde:

CA_{x,efluente} - Carga no efluente do decantador primário em kg/d;

CA_{x,afluente} - Carga no afluyente ao decantador primário em kg/d;

η_x - Rendimento de remoção em %;

Para determinação de produção de sólidos no decantador primário utilizou-se a taxa de 0,30 kg_{SS}/kg_{DQO}aplicada na Equação .

$$P_{x,DP} = CA_{DQO\text{aplicada}} \cdot P_{x,ex} \quad \text{Equação 31}$$

onde:

$P_{x,DP}$	- Produção de lodo no decantador primário em kg_{SS}/d ;
$CA_{DQOaplicada}$	- Carga de DQO aplicada em kg/d ;
$p_{x,ex}$	- Produção específica de lodo excedente em $kg_{SS}/kg_{DQOaplicada}$

Os resultados referentes ao dimensionamento do decantador primário são apresentados na tabela 15.

Tabela 17 – Resultados do decantador primário

Parâmetro	Unidade	Valor
Unidades	-	2
Diâmetro mínimo	m	10,64
Área mínima	m^2	177,78
Altura útil	m	3,50
Altura livre	m	0,50
Altura total	m	4,00
Volume parcial	m^3	661,73
Volume total	m^3	1.323,46
Produção mássica de lodo primário	kg_{SS}/d	3.300,00
Carga DBO5 efluente do decantador primário	kg_{DBO5}/d	3.780,00
Carga de sólidos suspensos efluente do decantador primário	kg_{SS}/d	2.700,00
Carga NTK efluente do decantador primário	kg_{NTK}/d	990,00

O tanque de aeração convencional que segue ao reator decantador primário é dimensionado em analogia com a metodologia apresentada anteriormente.

Tabela 18 – Parâmetros de projeto - Tanque de aeração após decantador primário

Parâmetro	Unidade	Valor	Fonte
Carga DBO	Kg/d	3.780	-
Carga Sólidos Suspensos	Kg/d	2.700	-
Carga NTK	Kg/d	990	-
Coeficiente de produção celular Y	gSSV/gDBO5removida	0,60	(1)
Idade de Lodo θ_c	d	10	(1)
Concentração de sólidos suspensos voláteis X_v	mg/l	2.250	(1)
Coeficiente de respiração endógena K_d	d ⁻¹	0,08	(1)
Fracção biodegradável f_b	mgSSvb/mgSSV	0,70	(1)
Produção de lodo secundário $P_{x,ex}$	kgSS/kgDBO5removida	0,70	(1)
(1) Von Sperling (2012)			

Tabela 19 – Resultados Tanque de Aeração após decantador primário

Parâmetro	Unidade	Valor
Volume para nitrificação	m ³	6.188
Volume para desnitrificação	m ³	1.667
Volume total	m ³	7.855
Altura útil	m	3,50
Altura total	m	4,00
Área do tanque de aeração total	m ²	2.244
Unidades dos tanques de aeração	-	2
Volume do tanque de aeração parcial	m ³	3.927
Área do tanque de aeração parcial	m ²	1.122
Produção de lodo aeróbio excedente	kgSS/d	2.646
Taxa de transferência de oxigênio teórica	kgO ₂ /d	4.560
Taxa de transferência de oxigênio prática	kgO ₂ /d	8.208
Potencia instalada para aeração	kW	244,29
Consumo de energia elétrica para aeração	kWh/a	2.139.982

Tabela 20 – Parâmetros e resultados para os decantadores secundários - Tanque de Aeração após UASB

Parâmetro	Unidade	Valor
TAH	$\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{d})$	30
TAS	$\text{kg}_{\text{SS}}/(\text{m}^2.\text{d})$	120
$A_{\text{min.TAS}}$	m^2	533
$A_{\text{min.TAH}}$	m^2	720
Numero de decantadores secundários	-	2
Diâmetro mínimo	m	21,41
Diâmetro adotado	m	21,50
Altura parte cilíndrica	m	3,50
Declividade do fundo	%	8
Volume total	m^3	2.758,17
Volume parcial	m^3	1.379,09

A soma dos lodos formados pelo lodo primário e lodo aeróbio excedente é de 5.946 $\text{kg}_{\text{SS}}/\text{d}$, quantidade esta encaminhado para a unidade de digestão anaeróbia de lodo.

O digestor de lodo pode ser calculado por meio do tempo de detenção hidráulica e a vazão de esgoto. A vazão de esgoto pode ser determinada pela Equação .

$$Q_{\text{lodo,misto}} = \frac{(P_{\text{x,DP}} + P_{\text{x,LA}})}{C_{\text{SS, adensado}}} = \frac{(3.300 \text{ kg}_{\text{SS}}/\text{d} + 2.646 \text{ kg}_{\text{SS}}/\text{d})}{60 \text{ kg}_{\text{SS}}/\text{m}^3} \quad \text{Equação 32}$$

$$Q_{\text{lodo,misto}} = \frac{5.946 \text{ kg}_{\text{SS}}/\text{d}}{60 \text{ kg}_{\text{SS}}/\text{m}^3} = 99,10 \text{ m}^3/\text{d}$$

onde:

$Q_{\text{lodo,misto}}$ - Vazão de lodo misto afluente ao digestor de lodo em m^3/d ;

$P_{\text{x,DP}}$ - Produção de lodo no decantador primário em $\text{kg}_{\text{SS}}/\text{d}$;

$P_{\text{x,LA}}$ - Produção de lodo no aeróbio excedente em $\text{kg}_{\text{SS}}/\text{d}$;

$C_{\text{SS,adensado}}$ - Teor de sólidos em $\text{kg}_{\text{SS}}/\text{m}^3$.

Conforme Andreoli (2001), o tempo de detenção hidráulica deve ser entre 18 e 25 dias no caso de lodos provenientes de decantação primária com condições mesofílicas nos digestores. Para garantir um bom funcionamento, optou-se por um tempo de detenção hidráulica de 22 dias.

O volume dos digestores anaeróbios de lodo é calculado empregando a (Equação 33).

$$V_{\text{digestor}} = \text{TDH} \cdot Q_{\text{lodo,misto}} = 22 \text{ d} \cdot 99,10 \text{ m}^3/\text{d} = 2.600 \text{ m}^3$$

(Equação 33)

Onde:

- V_{digestor} - Volume útil dos digestores anaeróbios de lodo em m^3 ;
- TDH - Tempo de detenção hidráulica em h;
- $Q_{\text{lodo,misto}}$ - Vazão de lodo misto afluyente ao digestor de lodo em m^3/d ;

Consideraram-se dois digestores com volume útil parcial de 1.300 m^3 . Considerando a relação entre os sólidos suspensos voláteis e os sólidos suspensos totais igual a 0,72, teremos a seguinte distribuição no afluyente aos biodigestores.

Sólidos Voláteis	$P_{\text{xv,afl}} = (P_{\text{x,DP}} + P_{\text{x,LA}}) \cdot \text{SSV/SS}$ $P_{\text{xv,afl}} = 5.946 \text{ kg}_{\text{SS}}/\text{d} \cdot 0,72 \text{ kg}_{\text{SS}}/\text{kg}_{\text{SSV}} = 4.281 \text{ kg}_{\text{SSV}}/\text{d}$
Sólidos Fixos	$P_{\text{xf}} = (P_{\text{x,DP}} + P_{\text{x,LA}}) - P_{\text{xv}}$ $P_{\text{xf}} = 5.946 \text{ kg}_{\text{SS}}/\text{d} - 4.281 \text{ kg}_{\text{SSV}}/\text{d} = 1.665 \text{ kg}_{\text{SF}}/\text{d}$

Para este volume é verificado a taxa de aplicação de sólidos por:

$$\text{TAS}_{\text{digestor}} = \frac{P_{\text{xv,afl}}}{V} = \frac{4.281 \text{ kg}_{\text{SSV}}/\text{d}}{2.600 \text{ m}^3} = 1,65 \text{ kg}_{\text{SV}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

Onde:

- $\text{TAS}_{\text{digestor}}$ - Taxa de aplicação de sólidos voláteis para o digestor [$\text{kg}_{\text{SV}}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$];
- $P_{\text{xv,afl}}$ - Carga de sólidos voláteis no afluyente ao digestor em $\text{kg}_{\text{SSV}}/\text{d}$;
- V_{digestor} - Volume útil dos digestores anaeróbios de lodo em m^3 .

Considerando uma eficiência de remoção dos sólidos voláteis de 50% na digestão e sabendo que os sólidos fixos permanecem inalterados, a distribuição da carga de sólidos efluente do digestor será:

$$\begin{aligned}\text{Sólidos Voláteis} \quad P_{xv,efl} &= (1 - 50\%) \cdot P_{xv,afl} = (1 - 50\%) \cdot 4.281 \text{ kg}_{SSV}/d \\ P_{xv,efl} &= 2.140,6 \text{ kg}_{SSV}/d\end{aligned}$$

$$\text{Sólidos Fixos} \quad P_{xf,efl} = P_{xf,afl} = 1.665 \text{ kg}_{SF}/d$$

$$\text{Sólidos Totais} \quad P_{x,LA} = P_{xf,efl} + P_{xv,efl} = 3.805 \text{ kg}_{SS}/d$$

A produção de biogás pode ser estimada a partir dos sólidos voláteis digeridos e uma taxa específica adotada de $0,80 \text{ m}^3/\text{kg}_{SV, digerido}$ por:

$$\begin{aligned}Q_{\text{biogás}} &= q_{\text{biogás}} \cdot (P_{xv,afl} - P_{xv,efl}) \\ Q_{\text{biogás}} &= 0,8 \text{ m}^3/\text{kg}_{SV, destruído} \cdot (4.281 - 2.140) \text{ kg}_{SSV}/d = 1.712 \text{ m}^3/d\end{aligned}$$

Onde:

$$\begin{aligned}Q_{\text{biogás}} &\quad - \text{Vazão de biogás gerado em m}^3/d; \\ q_{\text{biogás}} &\quad - \text{Taxa específica de geração de biogás em m}^3/\text{kg}_{SV\text{destruído}};\end{aligned}$$

APÊNDICES – CUSTOS TOTAIS DE CADA ALTERNATIVA

CUSTO DO CICLO DE VIDA

PROJETO: ALTERNATIVA A1 (ETE 1)

Taxa de Juros	Anos:	Taxas:
	2015-2035	8,0%

R\$13.632.896

-20 anos ACCV

FLUXOS DE CAIXA REAIS ANUAIS

(Início)	Custos	Custos	Custos	Valor	Valor
Ano	Implantação e Subst.	Opex Anuais	Anuais Totais	Presente dos Custos	Presente dos Custos
				(anuais)	(acumulados)
2.015	R\$ -	R\$ 681.644,80			
2.015	R\$ -	-	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
2.016	R\$ -	R\$ 736.176,38	R\$ 736.176,38	R\$ 681.644,80	R\$ 681.644,80
2.017	R\$ -	R\$ 795.070,49	R\$ 795.070,49	R\$ 681.644,80	R\$ 1.363.289,60
2.018	R\$ -	R\$ 858.676,13	R\$ 858.676,13	R\$ 681.644,80	R\$ 2.044.934,40
2.019	R\$ -	R\$ 927.370,23	R\$ 927.370,23	R\$ 681.644,80	R\$ 2.726.579,20
2.020	R\$ -	R\$ 1.001.559,84	R\$ 1.001.559,84	R\$ 681.644,80	R\$ 3.408.224,00
2.021	R\$ -	R\$ 1.081.684,63	R\$ 1.081.684,63	R\$ 681.644,80	R\$ 4.089.868,80
2.022	R\$ -	R\$ 1.168.219,40	R\$ 1.168.219,40	R\$ 681.644,80	R\$ 4.771.513,60
2.023	R\$ -	R\$ 1.261.676,95	R\$ 1.261.676,95	R\$ 681.644,80	R\$ 5.453.158,40
2.024	R\$ -	R\$ 1.362.611,11	R\$ 1.362.611,11	R\$ 681.644,80	R\$ 6.134.803,20
2.025	R\$ -	R\$ 1.471.620,00	R\$ 1.471.620,00	R\$ 681.644,80	R\$ 6.816.448,00
2.026	R\$ -	R\$ 1.589.349,60	R\$ 1.589.349,60	R\$ 681.644,80	R\$ 7.498.092,80
2.027	R\$ -	R\$ 1.716.497,37	R\$ 1.716.497,37	R\$ 681.644,80	R\$ 8.179.737,60
2.028	R\$ -	R\$ 1.855.817,37	R\$ 1.855.817,37	R\$ 681.644,80	R\$ 8.861.382,40
2.029	R\$ -	R\$ 2.002.122,76	R\$ 2.002.122,76	R\$ 681.644,80	R\$ 9.543.027,20
2.030	R\$ -	R\$ 2.162.292,58	R\$ 2.162.292,58	R\$ 681.644,80	R\$ 10.224.672,00
2.031	R\$ -	R\$ 2.335.275,99	R\$ 2.335.275,99	R\$ 681.644,80	R\$ 10.906.316,80
2.032	R\$ -	R\$ 2.522.098,07	R\$ 2.522.098,07	R\$ 681.644,80	R\$ 11.587.961,60
2.033	R\$ -	R\$ 2.723.865,91	R\$ 2.723.865,91	R\$ 681.644,80	R\$ 12.269.606,40
2.034	R\$ -	R\$ 2.941.775,19	R\$ 2.941.775,19	R\$ 681.644,80	R\$ 12.951.251,20
2.035	R\$ -	R\$ 3.177.117,20	R\$ 3.177.117,20	R\$ 681.644,80	R\$ 13.632.896,00
Custo total do sistema				R\$13.632.896	-20 anos ACCV

CUSTO DO CICLO DE VIDA

PROJETO: ALTERNATIVA A2 (ETE 1)

Taxa de Juros	Anos	Taxa
	2015-2035	8,0%

R\$ 9.212.809 -20 anos ACCV**FLUXOS DE CAIXA REAIS ANUAIS**

(Início)	Custos		Custos		Valor	
Ano	Implantação e Subst.		Opex Anuais		Presente dos Custos	
					(anuais)	(acumulados)
2.015	R\$	6.932.474,23	R\$	75.012,04		
2.015	R\$	6.932.474,23			R\$ 6.932.474,23	36.932.474
2.016	R\$	-		81.013	R\$ 75.012	7.007.486
2.017	R\$	-		87.494	R\$ 75.012	7.082.498
2.018	R\$	-		94.494	R\$ 75.012	7.157.510
2.019	R\$	-		102.053	R\$ 75.012	7.232.522
2.020	R\$	-		110.217	R\$ 75.012	7.307.534
2.021	R\$	-		119.035	R\$ 75.012	7.382.546
2.022	R\$	-		128.557	R\$ 75.012	7.457.558
2.023	R\$	196.913,00		138.842	R\$ 181.398	7.638.917
2.024	R\$	-		149.849	R\$ 75.012	7.713.969
2.025	R\$	349.512,73		161.945	R\$ 236.904	7.890.873
2.026	R\$	-		174.901	R\$ 75.012	8.025.885
2.027	R\$	-		188.893	R\$ 75.012	8.100.897
2.028	R\$	-		204.005	R\$ 75.012	8.175.909
2.029	R\$	-		220.325	R\$ 75.012	8.250.921
2.030	R\$	1.623.568,00		237.951	R\$ 586.820	8.837.749
2.031	R\$	-		256.987	R\$ 75.012	8.912.761
2.032	R\$	-		277.546	R\$ 75.012	8.987.773
2.033	R\$	-		299.750	R\$ 75.012	9.062.785
2.034	R\$	-		323.730	R\$ 75.012	9.137.797
2.035	R\$	-		349.628	R\$ 75.012	9.212.809
Custo total do sistema					R\$ 9.212.809	-20 anos ACCV

CUSTO DO CICLO DE VIDA

PROJETO: ALTERNATIVA A3 (ETE 1)

Taxa de Juros	Anos:	Taxas:
	2015-2035	8,0%

R\$ 4.638.427**~20-anos ACCV****FLUXOS DE CAIXA REAIS ANUAIS**

(Início)	Custos Implantação e Subst.	Custos Opex Anuais	Custos Anuais Totais	Valor Presente dos Custos Totais	Valor Presente dos Custos Totais
Ano					
2.015	R\$ 3.162.564,73	R\$ 34.788,41		(anuais)	(acumulados)
2.015	R\$ 3.162.564,73	--	R\$ 3.162.565	R\$ 3.162.564,73	R\$ 3.162.564,73
2.016	R\$ -	37.571	37.571	34.788	3.197.353
2.017	R\$ -	40.577	40.577	34.788	3.232.142
2.018	R\$ -	43.823	43.823	34.788	3.266.930
2.019	R\$ -	47.329	47.329	34.788	3.301.718
2.020	R\$ -	51.116	51.116	34.788	3.336.507
2.021	R\$ -	55.205	55.205	34.788	3.371.295
2.022	R\$ -	59.621	59.621	34.788	3.406.084
2.023	R\$ 196.913,00	64.391	261.304	141.174	3.547.258
2.024	R\$ -	69.542	69.542	34.788	3.582.046
2.025	R\$ 349.512,73	75.106	424.618	196.680	3.778.727
2.026	R\$ -	81.114	81.114	34.788	3.813.515
2.027	R\$ -	87.603	87.603	34.788	3.848.304
2.028	R\$ -	94.611	94.611	34.788	3.883.092
2.029	R\$ -	102.180	102.180	34.788	3.917.880
2.030	R\$ 1.623.568,00	110.555	1.733.923	546.605	4.464.485
2.031	R\$ -	119.183	119.183	34.788	4.499.274
2.032	R\$ -	128.718	128.718	34.788	4.534.062
2.033	R\$ -	139.015	139.015	34.788	4.568.850
2.034	R\$ -	150.136	150.136	34.788	4.603.639
2.035	R\$ -	162.147	162.147	34.788	4.638.427
Custo total do sistema				R\$ 4.638.427	~20-anos ACCV

CUSTO DO CICLO DE VIDA

PROJETO: ALTERNATIVA A4 (ETE 1)

Taxa de Juros	Anos:	Taxas:
	2015-2035	8,0%

R\$ 13.160.805**-20-anos ACCV****FLUXOS DE CAIXA REAIS ANUAIS**

(Início)	Custos Implantação e Subst.	Custos Opex Anuais	Custos Anuais Totais	Valor Presente dos Custos	Valor Presente dos Custos
				(anuais)	(acumulados)
2.015	R\$ 5.588.255,23	R\$ 364.716,86			
2.015	R\$ 5.588.255,23	-	R\$ 5.588.255	R\$ 5.588.255,23	\$5.588.255
2.016	R\$ -	393.894	393.894,211	364.717	5.952.972
2.017	R\$ -	425.406	425.406	364.717	6.317.689
2.018	R\$ -	459.438	459.438	364.717	6.682.406
2.019	R\$ -	490.195	490.195	364.717	7.047.123
2.020	R\$ -	535.889	535.889	364.717	7.411.840
2.021	R\$ -	578.760	578.760	364.717	7.776.556
2.022	R\$ -	625.061	625.061	364.717	8.141.273
2.023	R\$ 196.913,00	675.065	871.978	471.103	8.612.376
2.024	R\$ -	729.071	729.071	364.717	8.977.093
2.025	R\$ 180.840,00	787.396	968.236	448.481	9.425.574
2.026	R\$ -	850.388	850.388	364.717	9.790.291
2.027	R\$ -	918.419	918.419	364.717	10.155.007
2.028	R\$ -	991.893	991.893	364.717	10.519.724
2.029	R\$ -	1.071.244	1.071.244	364.717	10.884.441
2.030	R\$ 279.349,00	1.156.944	1.436.293	452.779	11.337.220
2.031	R\$ -	1.249.489	1.249.489	364.717	11.701.937
2.032	R\$ -	1.349.459	1.349.459	364.717	12.066.654
2.033	R\$ -	1.457.418	1.457.418	364.717	12.431.371
2.034	R\$ -	1.574.009	1.574.009	364.717	12.796.088
2.035	R\$ -	1.699.930	1.699.930	364.717	13.160.805
Custo total do sistema				R\$ 13.160.805	-20-anos ACCV

CUSTO DO CICLO DE VIDA

PROJETO: ALTERNATIVA A5 (ETE 1)

Taxa de Juros	Anos:	Taxas:
	2015-2035	8,0%

R\$ 7.766.716**=20-anos ACCV****FLUXOS DE CAIXA REAIS ANUAIS**

(Início)	Custos Implantação e Subst.	Custos Opex Anuais	Custos Anuais Totais	Valor Presente dos Custos (anuais)	Valor Presente dos Custos (acumulados)
2.015	R\$ 1.818.345,73	R\$ 283.507,91		R\$ 1.818.345,73	51.818.346
2.015	R\$ 1.818.345,73	—	R\$ 1.818.346	R\$ 1.818.345,73	2.101.834
2.016	R\$ -	306.189	306.189,546	283.508	2.385.362
2.017	R\$ -	330.684	330.684	283.508	2.668.869
2.018	R\$ -	357.138	357.138	283.508	2.952.377
2.019	R\$ -	383.709	383.709	283.508	3.235.885
2.020	R\$ -	416.566	416.566	283.508	3.519.393
2.021	R\$ -	449.891	449.891	283.508	3.802.901
2.022	R\$ -	483.883	483.883	283.508	4.192.795
2.023	R\$ 196.913,00	524.753	721.666	389.894	4.476.303
2.024	R\$ -	566.734	566.734	283.508	4.843.575
2.025	R\$ 180.840,00	612.072	792.912	367.272	5.127.083
2.026	R\$ -	661.038	661.038	283.508	5.410.591
2.027	R\$ -	713.921	713.921	283.508	5.694.098
2.028	R\$ -	771.035	771.035	283.508	5.977.606
2.029	R\$ -	832.718	832.718	283.508	6.349.177
2.030	R\$ 279.349,00	899.335	1.178.684	371.570	6.632.685
2.031	R\$ -	971.282	971.282	283.508	6.916.193
2.032	R\$ -	1.048.984	1.048.984	283.508	7.199.701
2.033	R\$ -	1.132.903	1.132.903	283.508	7.483.208
2.034	R\$ -	1.223.535	1.223.535	283.508	7.766.716
2.035	R\$ -	1.321.418	1.321.418	283.508	
Custo total do sistema			R\$ 7.766.716	=20-anos ACCV	

CUSTO DO CICLO DE VIDA

PROJETO: ALTERNATIVA A6 (ETE 1)

Taxa de Juros	Anos:	Taxas:
	2015-2035	8,0%

R\$ 8.334.251**=20-anos ACCV****FLUXOS DE CAIXA REAIS ANUAIS**

(Início)	Custos Implantação e Subst.	Custos Opex Anuais	Custos Anuais Totais	Valor Presente dos Custos (anuais)	Valor Presente dos Custos (acumulados)
2.015	R\$ 3.089.488,50	R\$ 262.238,13			
2.015	R\$ 3.089.488,50	—	R\$ 3.089.489	R\$ 3.089.488,50	\$3.089.489
2.016	R\$ -	283.217	283.217,175	262.238	3.351.727
2.017	R\$ -	305.875	305.875	262.238	3.613.965
2.018	R\$ -	330.345	330.345	262.238	3.876.203
2.019	R\$ -	356.772	356.772	262.238	4.138.441
2.020	R\$ -	385.314	385.314	262.238	4.400.679
2.021	R\$ -	416.139	416.139	262.238	4.662.917
2.022	R\$ -	449.430	449.430	262.238	4.925.155
2.023	R\$ -	485.384	485.384	262.238	5.187.394
2.024	R\$ -	524.215	524.215	262.238	5.449.632
2.025	R\$ -	566.152	566.152	262.238	5.711.870
2.026	R\$ -	611.445	611.445	262.238	5.974.108
2.027	R\$ -	660.360	660.360	262.238	6.236.346
2.028	R\$ -	713.189	713.189	262.238	6.498.584
2.029	R\$ -	770.244	770.244	262.238	6.760.822
2.030	R\$ -	831.864	831.864	262.238	7.023.060
2.031	R\$ -	898.413	898.413	262.238	7.285.299
2.032	R\$ -	970.286	970.286	262.238	7.547.537
2.033	R\$ -	1.047.909	1.047.909	262.238	7.809.775
2.034	R\$ -	1.131.741	1.131.741	262.238	8.072.013
2.035	R\$ -	1.222.281	1.222.281	262.238	8.334.251
Custo total do sistema			R\$ 8.334.251	=20-anos ACCV	

CUSTO DO CICLO DE VIDA

PROJETO: ALTERNATIVA A1 (ETE 2)

Taxa de Juros	Anos:	Taxas:
	2015-2035	8,0%

R\$ 17.776.960**=20-anos ACCV****FLUXOS DE CAIXA REAIS ANUAIS**

(Início)	Custos Implantação e Subst.	Custos Opex Anuais	Custos Anuais Totais	Valor Presente dos Custos (anuais)	Valor Presente dos Custos (acumulados)
Ano					
2.015	R\$ -	R\$ 888.848,00		(anuais)	(acumulados)
2.017	R\$ -	-	R\$ -	-	50
2.016	0	959.956	959.956	888.848	888.848
2.017	0	1.036.752	1.036.752	888.848	1.777.696
2.018	0	1.119.692	1.119.692	888.848	2.666.544
2.019	0	1.209.268	1.209.268	888.848	3.555.392
2.020	0	1.306.009	1.306.009	888.848	4.444.240
2.021	0	1.410.490	1.410.490	888.848	5.333.088
2.022	0	1.523.329	1.523.329	888.848	6.221.936
2.023	0	1.645.196	1.645.196	888.848	7.110.784
2.024	0	1.776.811	1.776.811	888.848	7.999.632
2.025	0	1.918.956	1.918.956	888.848	8.888.480
2.026	0	2.072.473	2.072.473	888.848	9.777.328
2.027	0	2.238.270	2.238.270	888.848	10.666.176
2.028	0	2.417.332	2.417.332	888.848	11.555.024
2.029	0	2.610.719	2.610.719	888.848	12.443.872
2.030	0	2.819.576	2.819.576	888.848	13.332.720
2.031	0	3.045.142	3.045.142	888.848	14.221.568
2.032	0	3.288.754	3.288.754	888.848	15.110.416
2.033	0	3.551.854	3.551.854	888.848	15.999.264
2.034	0	3.836.002	3.836.002	888.848	16.888.112
2.035	0	4.142.882	4.142.882	888.848	17.776.960
Custo total do sistema				R\$ 17.776.960	=20-anos ACCV

CUSTO DO CICLO DE VIDA

PROJETO: ALTERNATIVA A2 (ETE 2)

Taxa de Juros	Anos:	Taxas:
	2015-2035	8,0%

R\$ 12.876.314**=20-anos ACCV****FLUXOS DE CAIXA REAIS ANUAIS**

(Início) Ano	Custos Implantação e Subst.	Custos Opex Anuais	Custos Anuais Totais	Valor Presente dos Custos (anuais)	Valor Presente dos Custos (acumulados)
2.015	R\$ 6.932.474,23	R\$ 258.187,26			
2.015	R\$ 6.932.474,23	—	R\$ 6.932.474	R\$ 6.932.474,23	\$6.932.474
2.016	R\$ —	278.842	278.842	258.187	7.190.661
2.017	R\$ —	301.159	301.159	258.187	7.448.849
2.018	R\$ —	325.242	325.242	258.187	7.707.036
2.019	R\$ —	351.260	351.260	258.187	7.965.223
2.020	R\$ —	379.362	379.362	258.187	8.223.411
2.021	R\$ —	409.711	409.711	258.187	8.481.598
2.022	R\$ —	442.488	442.488	258.187	8.739.785
2.023	R\$ 196.913,00	477.887	674.800	364.373	9.104.358
2.024	R\$ —	516.118	516.118	258.187	9.362.546
2.025	R\$ 349.512,73	557.407	906.920	420.079	9.782.625
2.026	R\$ —	601.999	601.999	258.187	10.040.812
2.027	R\$ —	650.159	650.159	258.187	10.298.999
2.028	R\$ —	702.172	702.172	258.187	10.557.187
2.029	R\$ —	758.346	758.346	258.187	10.815.374
2.030	R\$ 1.623.568,00	819.014	2.442.582	770.004	11.585.377
2.031	R\$ —	884.535	884.535	258.187	11.843.565
2.032	R\$ —	955.298	955.298	258.187	12.101.752
2.033	R\$ —	1.031.721	1.031.721	258.187	12.359.939
2.034	R\$ —	1.114.259	1.114.259	258.187	12.618.126
2.035	R\$ —	1.203.400	1.203.400	258.187	12.876.314
Custo total do sistema			R\$ 12.876.314	=20-anos ACCV	

CUSTO DO CICLO DE VIDA

PROJETO: ALTERNATIVA A3 (ETE 2)

Taxa de Juros	Anos:	Taxas:
	2015-2035	8,0%

R\$ 8.515.776**=20-anos ACCV****FLUXOS DE CAIXA REAIS ANUAIS**

(Início)	Custos	Custos	Custos	Valor	Valor
Ano	Implantação e Subst.	Opex Anuais	Anuais Totais	Presente dos Custos	Presente dos Custos
				(anuais)	(acumulados)
2.015	R\$ 3.162.564,73	R\$ 228.655,83			
2.015	R\$ 3.162.564,73	-	R\$ 3.162.565	R\$ 3.162.564,73	\$3.162.565
2.016	R\$ -	246.948	246.948	228.656	3.391.221
2.017	R\$ -	266.704	266.704	228.656	3.619.876
2.018	R\$ -	288.040	288.040	228.656	3.848.532
2.019	R\$ -	311.084	311.084	228.656	4.077.188
2.020	R\$ -	335.970	335.970	228.656	4.305.844
2.021	R\$ -	362.848	362.848	228.656	4.534.500
2.022	R\$ -	391.878	391.878	228.656	4.763.156
2.023	R\$ 196.913,00	423.226	620.139	335.042	5.098.197
2.024	R\$ -	457.084	457.084	228.656	5.326.853
2.025	R\$ 349.512,73	493.631	843.164	390.548	5.717.401
2.026	R\$ -	533.143	533.143	228.656	5.946.057
2.027	R\$ -	575.794	575.794	228.656	6.174.713
2.028	R\$ -	621.858	621.858	228.656	6.403.368
2.029	R\$ -	671.606	671.606	228.656	6.632.024
2.030	R\$ 1.623.568,00	725.335	2.348.903	740.472	7.372.496
2.031	R\$ -	783.362	783.362	228.656	7.601.152
2.032	R\$ -	846.031	846.031	228.656	7.829.808
2.033	R\$ -	913.713	913.713	228.656	8.058.464
2.034	R\$ -	986.810	986.810	228.656	8.287.120
2.035	R\$ -	1.065.755	1.065.755	228.656	8.515.776
Custo total do sistema				R\$ 8.515.776	=20-anos ACCV

CUSTO DO CICLO DE VIDA

PROJETO: ALTERNATIVA A4 (ETE 2)

Taxa de Juros	Anos:	Taxa:
	2015-2035	8,0%

RS 15.270.315**=20-anos ACCV****FLUXOS DE CAIXA REAIS ANUAIS**

(Início) Ano	Custos Implantação e Subst.	Custos Opex Anuais	Custos Anuais Totais	Valor Presente dos Custos	Valor Presente dos Custos
				(anuais)	(acumulados)
2.015	RS 5.588.255,23	RS 470.192,39			
2.015	RS 5.588.255,23	-	RS 5.588.255	RS 5.588.255,23	RS 5.588.255
2.016	RS -	507.808	507.808	470.192	6.058.448
2.017	RS -	548.432	548.432	470.192	6.528.640
2.018	RS -	592.307	592.307	470.192	6.998.832
2.019	RS -	639.692	639.692	470.192	7.469.025
2.020	RS -	690.867	690.867	470.192	7.939.217
2.021	RS -	746.136	746.136	470.192	8.409.410
2.022	RS -	805.827	805.827	470.192	8.879.602
2.023	RS 196.913,00	870.293	1.067.206	576.578	9.456.180
2.024	RS -	939.917	939.917	470.192	9.926.373
2.025	RS 180.840,00	1.015.110	1.195.950	553.956	10.480.329
2.026	RS -	1.096.319	1.096.319	470.192	10.950.521
2.027	RS -	1.184.024	1.184.024	470.192	11.420.714
2.028	RS -	1.278.746	1.278.746	470.192	11.890.906
2.029	RS -	1.381.046	1.381.046	470.192	12.361.099
2.030	RS 279.349,00	1.491.530	1.770.879	558.255	12.919.353
2.031	RS -	1.610.852	1.610.852	470.192	13.389.546
2.032	RS -	1.739.720	1.739.720	470.192	13.859.738
2.033	RS -	1.878.898	1.878.898	470.192	14.329.931
2.034	RS -	2.029.210	2.029.210	470.192	14.800.123
2.035	RS -	2.191.547	2.191.547	470.192	15.270.315
Custo total do sistema			RS 15.270.315	=20-anos ACCV	

CUSTO DO CICLO DE VIDA

PROJETO: ALTERNATIVA A5 (ETE 2)

Taxa de Juros	Anos:	Taxas:
	2015-2035	8,0%

R\$ 10.909.777

=20-anos ACCV

FLUXOS DE CAIXA REAIS ANUAIS

(Início)	Custos	Custos	Custos	Valor	Valor
Ano	Implantação	Opex	Anuais	Presente dos	Presente dos
	e Subst.	Anuais	Totais	Custos	Custos
				(anuais)	(acumulados)
2.015	R\$ 1.818.345,73	R\$ 440.660,96			
2.015	R\$ 1.818.345,73	—	R\$ 1.818.346	R\$ 1.818.345,73	R\$ 1.818.345,73
2.016	R\$ -	473.914	473.914	440.661	2.259.007
2.017	R\$ -	513.987	513.987	440.661	2.699.668
2.018	R\$ -	555.106	555.106	440.661	3.140.329
2.019	R\$ -	599.514	599.514	440.661	3.580.990
2.020	R\$ -	647.476	647.476	440.661	4.021.651
2.021	R\$ -	699.274	699.274	440.661	4.462.311
2.022	R\$ -	755.215	755.215	440.661	4.902.972
2.023	R\$ 196.913,00	815.633	1.012.546	547.047	5.450.019
2.024	R\$ -	880.883	880.883	440.661	5.890.680
2.025	R\$ 180.840,00	951.334	1.132.194	524.425	6.415.105
2.026	R\$ -	1.027.462	1.027.462	440.661	6.855.766
2.027	R\$ -	1.109.659	1.109.659	440.661	7.296.427
2.028	R\$ -	1.198.432	1.198.432	440.661	7.737.088
2.029	R\$ -	1.294.307	1.294.307	440.661	8.177.749
2.030	R\$ 279.349,00	1.397.851	1.677.200	528.723	8.706.472
2.031	R\$ -	1.509.679	1.509.679	440.661	9.147.133
2.032	R\$ -	1.630.453	1.630.453	440.661	9.587.794
2.033	R\$ -	1.760.890	1.760.890	440.661	10.028.455
2.034	R\$ -	1.901.761	1.901.761	440.661	10.469.116
2.035	R\$ -	2.053.902	2.053.902	440.661	10.909.777
Custo total do sistema				R\$ 10.909.777	=20-anos ACCV

CUSTO DO CICLO DE VIDA

PROJETO: ALTERNATIVA A6 (ETE 2)

Taxa de Juros	Anos:	Taxas:
	2015-2035	8,0%

R\$ 9.552.878**=20-anos ACCV****FLUXOS DE CAIXA REAIS ANUAIS**

(Início) Ano	Custos Implantação e Subst.	Custos Opex Anuais	Custos Anuais Totais	Valor Presente dos Custos (anuais)	Valor Presente dos Custos (acumulados)
2.015	R\$ 3.089.488,50	R\$ 323.169,48			
2.015	R\$ 3.089.488,50	—	R\$ 3.089.489	R\$ 3.089.488,50	\$3.089.489
2.016	0	349.023	349.023	323.169	3.412.658
2.017	0	376.943	376.943	323.169	3.735.827
2.018	0	407.100	407.100	323.169	4.058.997
2.019	0	439.669	439.669	323.169	4.382.166
2.020	0	474.842	474.842	323.169	4.705.336
2.021	0	512.829	512.829	323.169	5.028.505
2.022	0	553.856	553.856	323.169	5.351.675
2.023	0	598.164	598.164	323.169	5.674.844
2.024	0	646.017	646.017	323.169	5.998.014
2.025	0	697.699	697.699	323.169	6.321.183
2.026	0	753.513	753.513	323.169	6.644.353
2.027	0	813.796	813.796	323.169	6.967.522
2.028	0	878.899	878.899	323.169	7.290.692
2.029	0	949.211	949.211	323.169	7.613.861
2.030	0	1.025.148	1.025.148	323.169	7.937.031
2.031	0	1.107.160	1.107.160	323.169	8.260.200
2.032	0	1.195.733	1.195.733	323.169	8.583.370
2.033	0	1.291.392	1.291.392	323.169	8.906.539
2.034	0	1.394.703	1.394.703	323.169	9.229.709
2.035	0	1.506.279	1.506.279	323.169	9.552.878
Custo total do sistema				R\$ 9.552.878	=20-anos ACCV